



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**ANALÝZA ELEMENTŮ ZADNÍHO KŘÍDLA FORMULE  
STUDENT**

ANALYSIS OF REAR WING ELEMENTS FOR FORMULA STUDENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Štěpán Kaspar**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Robert Popela, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Štěpán Kaspar**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Analýza elementů zadního křídla Formule student**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Velikost přítlaku na zadní nápravě soutěžního vozu je klíčovým parametrem aerodynamického návrhu takového vozu. Velikost a tvar elementů má zásadní vliv na velikost přítláčné síly. Je nutno nalézt optimální polohu jednotlivých prvků a jejich vzájemné nastavení.

### **Cíle bakalářské práce:**

Výběr vhodných profilů jednotlivých elementů zadního přítláčného křídla Formule student. Volba velikosti jednotlivých prvků, jejich vzájemného postavení a úhlů nastavení. Analýza vlivu na celkové aerodynamické charakteristiky vozidla.

### **Seznam doporučené literatury:**

KATZ, J., Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, Bentley Publishers, ISBN-13: 978-0837601427.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Hlavní záměr této bakalářské práce je provést analýzu zadního přitlačného křídla monopostu Formule student a na základě těchto dat vytvořit návrh křídla nového. Na začátku se práce zabývá analýzou pravidel soutěže Formule student, využití zadního křídla v motorsportu s důrazem na použití v rámci soutěže. Analýza a následná optimalizace na základě metodiky plochy odezvy probíhala s využitím CFD výpočtů v programu Ansys Fluent, pro který byla nejprve provedena kalibrace výpočtového modelu a analýza rozlišení výpočetní sítě.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika, Computational fluid dynamics (CFD), Zadní křídlo, Formule student, Optimalizace, Metoda plochy odezvy (RSM)

## ABSTRACT

Main objective of this bachelor thesis is to perform analysis of rear wing of the Formula student car and based on these information create design of new wing. The beginning of the thesis deals with Formula student competition rules, usage of rear wing in motorsport with main aim within this competition. Analysis and following optimization based on response surface methodology using CFD simulations in Ansys Fluent software, for which was performed calibration of computational model and mesh independence study.

## KEYWORDS

Aerodynamics, Computational fluid dynamics (CFD), Rear wing, Formula student, Optimization, Response Surface Methodology (RSM)

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KASPAR, Štěpán. *Analýza elementů zadního křídla Formule student*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132393>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 67 s. Vedoucí práce Robert Popela.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Roberta Popely, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Štěpán Kaspar

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení během vypracovávání této bakalářské práce a všem, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na vypracování této práce.



# OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Formule student .....</b>	<b>12</b>
1.1 Historie a tým TU Brno Racing .....	12
1.2 Omezení aerodynamických zařízení .....	13
1.2.1 Výškové omezení .....	13
1.2.2 Šířkové omezení .....	14
1.2.3 Délkové omezení .....	14
1.2.4 Pevnostní a tvarová omezení .....	14
<b>2 Aerodynamika zadního křídla .....</b>	<b>15</b>
2.1 Vliv aerodynamiky na dynamiku vozidel .....	15
2.2 Zadní křídlo v motorsportu .....	15
2.3 Zadní křídlo ve Formuli student .....	17
2.4 Historie aerodynamiky monopostů Dragon .....	19
2.5 Analýza aktuálního zadního křídla .....	20
<b>3 CFD .....</b>	<b>22</b>
3.1 Použití CFD v motorsportu .....	22
3.2 Kalibrace výpočetního modelu .....	23
3.2.1 Popis experimentu .....	23
3.2.2 Okrajové podmínky .....	23
3.2.3 Tunelové korekce .....	24
3.2.4 Turbulentní model .....	25
3.2.5 Geometrie pro kalibraci .....	25
3.2.6 Posouzení výsledků kalibrace výpočetního modelu .....	26
3.3 Analýza rozlišení výpočetní sítě .....	27
<b>4 Výpočet .....</b>	<b>30</b>
4.1 Geometrie .....	30
4.2 Výpočetní síť .....	31
4.3 Řešič .....	32
<b>5 Optimalizace .....</b>	<b>34</b>
5.1 Volba metody .....	34
5.1.1 Plánovaný experiment .....	34
5.1.2 Metoda plochy odezvy .....	35
5.1.3 Cílem řízená optimalizace .....	36
5.2 Proces optimalizace .....	37
5.3 Volba parametrů .....	37
5.4 Plocha odezvy .....	39
5.5 Analýza dat z plochy odezvy .....	40
5.6 Optimalizace na základě metody plochy odezvy .....	42

<b>Závěr .....</b>	<b>44</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>48</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam grafů.....</b>	<b>50</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>51</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>52</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>53</b>

## ÚVOD

V současnosti aerodynamika ve spojení s vozidly zaujímá jednu z hlavních oblastí zájmu. Jak v oblasti osobních automobilů, tak v motorsportu, kde se poprvé objevila v 60. letech minulého století v podobě jednoduchých přitlačných křídlech. Brzy se ukázal její pozitivní přínos a na vývoj se kladl čím dál tím větší důraz. Pokud chce motoristický tým vyhrávat závody, je aerodynamický paket naprostou nutností, pokud to pravidla dovolují. Soutěž Formule student není výjimkou a díky poměrně málo omezujícím restrikcím poskytuje studentům velkou volnost při jejich návrhu.

Tým TU Brno Racing se aktuálně řadí mezi světovou špičku. Pokud si i nadále chce udržet svoje umístění, je návrh aerodynamických prvků důležitý. Přidání přitlačných křídel je jednoduchý způsob, jak výrazně zlepšit aerodynamické vlastnosti vozidla.

Cílem této práce je provést analýzu vlastností zadního křídla monopostu Dragon X a za pomoci statistických a optimalizačních metod provést návrh nových křídel, které budou splňovat požadované vlastnosti.

# 1 FORMULE STUDENT

Formule student (dále FS) je mezinárodní vzdělávací projekt pro studenty technických univerzit, jehož cílem je poskytnout studentům možnost aplikovat teoretické znalosti v praxi. Každý studentský tým se chová jako soukromá firma, která je v tomto případě zastřešována univerzitou. Musí si zajistit finanční prostředky na svůj chod. Studenti bakalářských a magisterských studijních oborů mají za cíl každý rok sami navrhnout, postavit a otestovat závodní monopost. Tohoto projektu se aktuálně účastní přibližně 600 technických univerzit, jejichž studenti spolu během letních prázdnin měří síly na mezinárodních závodech. Týmy mohou soutěžit v 3 různých kategoriích: Combustion – vozidla se spalovacím motorem, Electric – vozidla s elektrickým motorem a Driverless – samořídící vozidlo. [1][2]

Týmy na závodech soutěží ve statických a dynamických disciplínách. Do statických disciplín se řadí: Business presentation, Cost and Manufacturing, Engineering Design Event. Tým zde prezentuje a obhajuje svá rozhodnutí při návrhu vozu, způsobu výroby jednotlivých dílů, jejich ceně a plán, jímž bude celý projekt zpeněžen. Dynamické disciplíny jsou: Acceleration, Skid Pad, Autocross, Endurance a Efficiency. V těchto disciplínách jsou hodnoceny celkové jízdní vlastnosti vozidel. Výsledné hodnocení je součet bodů z jednotlivých statických i dynamických disciplín.[3]



*Obr. 1.1 – Fotografie týmů po závodě Formula Student Germany [4]*

## 1.1 HISTORIE A TÝM TU BRNO RACING

V 80. letech minulého století se v USA zvyšovala poptávka po inženýrech, kteří by pracovali v automobilovém průmyslu. Velké koncerny ovšem nebyly spokojeny s nedostatkem praktických zkušeností inženýrů po absolvování vysoké školy. Z tohoto důvodu se roku 1981 pod záštitou Society of Automotive Engineers, konaly první závody nově vzniklé soutěže Formula SAE. Této soutěže se zúčastnily týmy z 4 vysokých škol. V následujících letech

soutěž získávala na popularitě. Postupně se do ní během následujících let zapojila většina univerzit v USA. [5]

V roce 1998 se v anglickém Warwicku konala exhibice, které se zúčastnily i 3 týmy z Velké Británie a 4 týmy z USA. Na základě tohoto úspěchu organizace Institute of Mechanical Engineers, ve spolupráci s SAE, zorganizovaly první závody soutěže nazývané FS. Dnes se za neoficiální mistrovství světa považují závody Formula Student Germany v Německu na okruhu Hockenheim, kterého se pravidelně účastní týmy z celého světa a vítězství má tu největší prestiž.[6]

Náš tým TU Brno Racing vznikl na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně v roce 2010 pod záštitou Automobilního ústavu. Každoročně má tým přibližně 40 stálých členů. Aktuálně probíhají finální práce na našem 10. monopostu se spalovacím motorem Dragon X a našem prvním monopostu na elektrický pohon Dragon e1. V mezinárodním hodnocení se tým aktuálně nachází na 9. místě po úspěšné sezonně s monopostem Dragon 9, který navštívil celkem 4 závody.[7][8]



*Obr. 1.2 – Monoposty Dragon X a Dragon e1[9]*

## 1.2 OMEZENÍ AERODYNAMICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Každá motoristická soutěž má svá pravidla a omezení, které musí závodní vozidlo splňovat, aby se mohlo účastnit závodů. Soutěž FS není výjimkou. V porovnání s jinými motoristickými soutěžemi nejsou pravidla omezující aerodynamické prvky na monopostu tak striktní a poskytují poměrně velkou volnost v jejich návrhu. Každý závod se řídí svými pravidly, která si jsou velmi podobná a jako vzor se užívá pravidla soutěže Formule Student Germany. Těmito pravidly se řídíme při návrhu a konstrukci našeho monopostu.[10]

### 1.2.1 VÝŠKOVÉ OMEZENÍ

Všechny aerodynamické prvky nacházející se před rovinou procházející nejvzdálenějším bodem hlavové opěrky nesmí být výše než 500 mm od země a prvky nacházející se za ní



nesmí být výš než 1200 mm od země. Aerodynamické zařízení nacházející se před osou přední nápravy a jsou širší, než nejvnitřnější bod pneumatiky nesmí přesáhnout výšku 250 mm. [10]

### 1.2.2 ŠÍŘKOVÉ OMEZENÍ

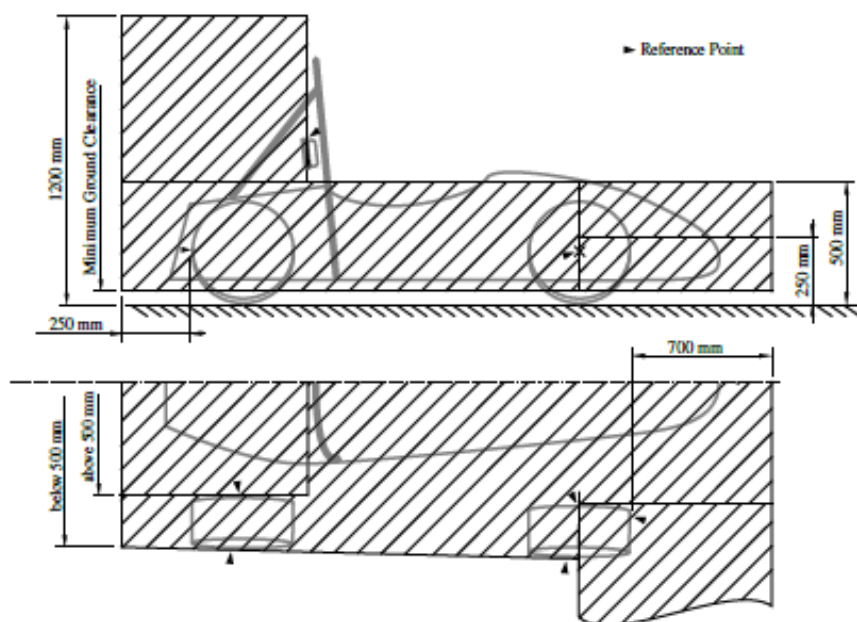
Veškeré aerodynamické prvky, které se vyskytují za přední nápravou a nepřevyšují výšku 500 mm od země nesmí být širší než vertikální rovina procházející nejvíce vnějším bodem předního i zadního kola nebo pneumatiky. Zařízení, která se nacházejí výše než 500 mm, nesmí přesáhnout nejvnitřnější bod zadní pneumatiky. [10]

### 1.2.3 DÉLKOVÉ OMEZENÍ

Žádný aerodynamický prvek nesmí být dále dozadu než 250 mm od nejzadnějšího místa zadní pneumatiky a dále dopředu než 700 mm od nejřednějšího místa přední pneumatiky. [10]

### 1.2.4 PEVNOSTNÍ A TVAROVÁ OMEZENÍ

Aerodynamická zařízení musí být schopna odolat zatížená 200 N rozložených na 225 mm<sup>2</sup> a během toho namáhání nesmí dojít k většímu vychýlení než 10 mm. Všechny prvky dále musí odolat síle 50 N v jakémkoli směru při maximálním vychýlení 25 mm. Hrany, které by se mohly dostat do kontaktu s chodcem, musí splňovat minimální zaoblení. Pokud se jedná o horizontální hranu je nejmenší dovolená hodnota 3 mm a vertikální 5 mm. [10]



Obr. 1.3 – Grafické znázornění omezení aerodynamických prvků [10]

## 2 AERODYNAMIKA ZADNÍHO KŘÍDLA

Aerodynamika byla důležitou disciplínou při návrhu automobilů od jejich počátku. Konstrukteři velice brzo rozpoznali, že tvar automobilu významně ovlivňuje celkovou spotřebu paliva. Snížení aerodynamického odporu je v oblasti vývoje osobních a nákladních automobilů velice důležitý nejen kvůli spotřebě paliva, ale kvůli minimalizaci prachových částic vzniklých spalováním. Od 60. let minulého století došlo k prvnímu využití aerodynamických prvků což způsobilo významné zlepšení časů na jedno kolo ve většině motoristických disciplín. V motorsportu je kladen hlavní důraz na zvýšení aerodynamického přitlaku. Snížení odporu je sekundární záležitostí. V dnešní době jsou aerodynamická zařízení na závodních vozidlech velice důležité ne-li nezbytné pro úspěch v soutěži. [11][12]

### 2.1 VLIV AERODYNAMIKY NA DYNAMIKU VOZIDEL

Pro popis celkové aerodynamiky na chování automobilu je nezbytné pochopit, jak funguje jedna z nejdůležitějších součástí každého automobilu, kterou je pneumatika. Akcelerační, brzdné a zatáčecí síly jsou síly zodpovědné za pohyb vozidla a vznikají třecími silami mezi vozovkou a pneumatikou díky její adhezi. Pneumatika se chová jako pružina, a proto všechny síly závisí na celkové vertikální síle a frikčním koeficientu mezi vozovkou a pneumatikou, jehož maximální limit je specifický pro danou pneumatiku. [12]

Zvýšení vertikální síly je možné dvěma způsoby: zvýšením hmotnosti vozidla nebo zvýšením přitlačné síly. Zvýšení hmotnosti ovšem není ideální řešení, protože ztrácíme celkový užitečný výkon. Naopak pokud se využije aerodynamických prvků, získá se požadovaná síla pouze s nízkým nárůstem odporu. Není důležitá celková hodnota aerodynamických sil, ale také jejich rozložení. Za pomoci momentové rovnováhy je možno celé plošné působení prodělení okolního vzduchu nahradit jedinou silou, jejíž působíště se nazývá střed tlaku (anglicky center of pressure, dále CoP). Pro celkovou dynamiku vozu je poloha tohoto bodu velmi důležitá, protože jeho pozice spolu s pozicí těžiště mají zásadní vliv na chování vozidla v zatáčkách. Spolu totiž určují přetáčivost nebo nedotáčivost monopostu. Pokud se celkové působíště gravitační a přitlačné síly nachází v přední části vozidla dochází k nedotáčení, pokud v zadní, nastává přetáčení. Vyšší přitlačná síla také umožňuje projet zatáčku při vyšší rychlosti díky lepší přilnavosti pneumatik. [12]

Na první pohled se může zdát, že při brždění má největší vliv na brzdnou dráhu aerodynamický odpor a s jeho pomocí dochází k zabrzdění na krátké vzdálenosti. Ovšem přitlačná síla má významnější vliv v souvislosti se zvýšením normálové síly působící na pneumatiky. Pokud je možno vyvinout dostatečné množství normálové síly při prudkém brždění nedojde k zablokování kol, způsobené nedostatečnou adhezí, a tudíž k rychlejšímu zabrzdění. Odporová síla výrazně ovlivňuje maximální dosažitelnou rychlost vozu na rovinkách a jeho celkovou spotřebu. V oblasti motorsportu se nejedná o důležitý faktor, na druhou stranu v oblasti osobních automobilů je hlavní oblastí zájmu. [12]

Aerodynamické vlastnosti mají významný vliv na výkon a ovladatelnost vozu. Je tedy důležité správně navrhnout všechny aerodynamické prvky, aby fungovaly správně jako celek a vytvářely spolu efekt vyžadovaný konstruktérem.

### 2.2 ZADNÍ KŘÍDLO V MOTORSPORTU

Jak již bylo zmíněno, aerodynamické síly mohou mít pozitivní vliv na dynamiku vozidel. Závodní automobily mají z pravidla náhon zadní nápravy. Aby nedocházelo k prokluzu

zadních kol a ztrátě přilnavosti je nutné vyvinout v zadní části automobilu větší normálovou sílu. Zadní křídlo je nejjednodušší aerodynamický prvek, kterým se dá modifikovat takřka jakékoli vozidlo s docílením požadovaného efektu. Zadní křídlo proniklo do téměř všech motoristických soutěží, ve kterých to pravidla dovolují např.: F1, LMP, Rallye a další. [12][13]

Světově nejznámější soutěží F1, která byla a dodnes je lídrem ve využití aerodynamických zařízení pro zlepšení výkonu svých monopostů. Díky obrovským finančním možnostem, jsou týmy schopni pro každou trať navrhovat jedinečně zadní křídlo pro daný okruh. V současnosti se objevují 3 typy zadních křidel odlišující se tvarem elementů: rovné, lžičkovité a se zvýšeným středem. Pro závodní okruhy s vyšším požadavkem na rychlost v zatáčkách jsou využívány přímé elementy a na tratích ve kterých je důležitá maximální rychlost je využíván převážně lžičkovitý typ křídla, které nabízí nižší odpor za cenu poklesu přitlaku. Jelikož zadní křídlo je velmi závislé na zbylé geometrii vozidla, není možné jednoznačně určit jeho ideální tvar. [14][15]



*Obr. 2.1 – Porovnání konfigurací zadních křidel na monopostu F1[16]*

Tvar zadního křídla je důležitý i v kategoriích, kde není kladen typicky důraz na maximalizaci přitlaku. Rallye vozy jsou ukázkovým příkladem. Automobily vycházejí ze silničních modelů, převážně kratších, kvůli dobré ovladatelnosti. Svoji stavbou se neblíží aerodynamicky optimálnímu tvaru. I přes to je zadní křídlo nedílnou součástí většiny vozidel. Pokud si prohlédneme konstrukce křídla na obr. 2.2 je možné si všimnout výrazných bočnic a ploutví po délce křídla. Automobil během závodu stráví poměrně velkou část času ve smyku a tím pádem je vystaven bočnímu proudění vzduchu. Bočnice a tyto ploutve pomáhají se stabilitou ovládání a stabilizaci ztráty přitlaku oddělením jednotlivých sektorů křídla. Toto řešení je nevýhodné při přímočarém pohybu, ovšem v zatáčkách je naopak výhodnější proti křídlu bez těchto prvků. [17]





Obr. 2.2 – Ukázka zadního křídla rallye vozu [17]

## 2.3 ZADNÍ KŘÍDLO VE FORMULI STUDENT

FS je proti ostatním kategoriím v mnoha ohledech velmi odlišná. Velikost monopostu je mnohem menší než například vozidlo typu F1 nebo Indy Car. Trať jsou kratší a tvořeny z velké části zatáčkami s poměrně krátkými rovinkami. Důsledkem je nízká maximální rychlost. Průměrná rychlost je přibližně 60 km/h, vysoký důraz na chování a stabilitu při zatáčení a akceleraci. Pro maximalizaci aerodynamických sil je nutné využívat profily vhodné pro nízké hodnoty  $Re$ , způsobené nízkými rychlostmi proudění okolního vzduchu.

Na rozdíl od ostatních soutěží pravidla ve FS omezují aerodynamické prvky. Jsou velmi uvolněná a pravidla definují pouze obálku prostoru, ve které se musí na vozidle nacházet. V případě zadního křídla není, jako v jiných kategoriích, omezen počet elementů, tvar bočnic a není definovaný předepsaný způsob uchycení. Studenti se při návrhu zadních křídel v FS snaží využít maximálního povoleného prostoru. Velká zadní křídla se tak stala charakteristickým znakem monopostu FS.

Zadní křídlo je velmi důležitou součástí aerodynamického balíku. Generuje až 1/3 celkového přítlaku a silně ovlivňuje jeho celkové rozložení. Svou podstatou je tento prvek jednoduchým příkladem více-elementového křídla. Nejčastěji se jedná o 3 až 4 elementy. Při využití vyššího počtu elementů mají poslední elementy velmi malou délku tělavy, aby se zamezilo odtrhávání mezní vrstvy. Jsou tudíž obtížně vyrobitelné. Často se také můžeme setkat s dalším elementem umístěným v oblasti nad náběžnou hranou prvního profilu. Využívá se k zamezení odtrhávání mezní vrstvy na posledním elementu křídla a poskytuje mírný vzrůst přítlakové síly, při malém zhoršení síly odporové. [18]



*Obr. 2.3 – Monopost týmu Rennteam [19]*

Filozofie návrhu zadního křídla je velice komplexní. Týmy využívají dvou druhů tvaru elementů: rovné a se zvýšeným středem (elementy lžičkovitého tvaru nemají v FS smysl). Je důležité zvážit, který typ zvolit. Rovné elementy jsou poměrně jednoduché na výrobu a díky své jednoduchosti nevyžadují komplexní vnitřní strukturu pro zajištění jejich dostatečné pevnosti, kterou vyžadují pravidla. Elementy se zvýšeným středem využívají týmy, které potenciál rovných elementů vyčerpali. Snaží se při návrhu tvaru vzít v úvahu celou geometrii vozidla a jsou poté schopni navrhnout vnitřní strukturu dostatečně kvalitně.



*Obr. 2.4 – Monopost týmu TU Wien [20]*



## 2.4 HISTORIE AERODYNAMIKY MONOPOSTŮ DRAGON

Prvním monopostem s aerodynamickým paketem byl Dragon 4. Pravidla aerodynamických prvků byla tehdy odlišná od dnešních, dovozovala konstrukci masivních křidel. Jelikož s návrhem v této době nikdo v týmu neměl zkušenosti, došlo k návrhu předního, zadního křídla pro svoji jednoduchost a základního difuzoru. [21]



Obr. 2.5 – Monopost Dragon 4 [22]

V sezóně monopostu Dragon 5 došlo k výrazné změně pravidel a prostor využívaný křídly byl zmenšen. Bylo tedy nutné přistoupit k návrhu pečlivěji, aby došlo k co nejmenší ztrátě kvality aerodynamického provedení. Zadní křídlo bylo tvořeno 3 profily. Byl použit účinnější tvar profilu. Dragon 6 byl evolucí předešlého návrhu. Zadní křídlo zůstalo nezměněno, byl pouze změněn jeho způsob uchycení pro snížení vlivu vibrací. [23][24][25]

Sezóna Dragona 7 byla zlomová. Tým se poprvé umístil ve světovém žebříčku v TOP 30 a od té doby až do dnešního dne ji neopustil. S nabytými zkušenostmi z předešlých sezón byla provedena první optimalizace polohy elementů zadního křídla, což mělo za následek zlepšení efektivity křídla o 13,6 %. V této sezóně započala větší kooperace se sekci podvozku a byl kladen větší důraz na rozložení tlaku napříč celým aerodynamickým paketem (45 % přtlaku na přední nápravě). [25][26]



Obr. 2.6 – Monopost Dragon 7 [27]

Zadní křídlo na monopostu Dragon 8 stavělo na křídlu monopostu Dragon 7 s přidáním 4. elementu do prostoru nad náběžnou hranou 1. elementu. U předchozí konfigurace docházelo k dřívějšímu odtrhávání mezní vrstvy na 3. elementu. Díky použití 4. elementu dojde ke změně směru proudění vzduchu v oblasti 3. elementu a pozdějšímu odtrhávání mezní vrstvy. I přes mírný nárůst odporu díky použití profilu navíc došlo k výraznému zlepšení efektivity celého křídla. [28]

Zadní křídlo monopostu Dragon 9 prošlo výraznou změnou. Poprvé bylo využito zahnutých profilů na zadním křídle. Profily a mezery mezi elementy byly zachovány. 4. element prošel parametrickou optimalizací. [29]



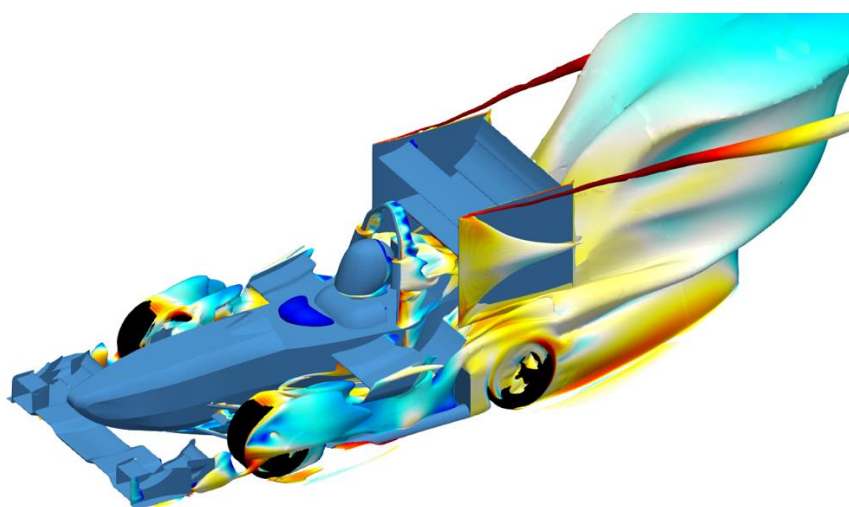
*Obr. 2.7 – Monopost Dragon 9 [30]*

## 2.5 ANALÝZA AKTUÁLNÍHO ZADNÍHO KŘÍDLA

Silně zakřivené elementy jsou velmi náročné na výrobu. Aby byla zachována požadovaná pevnost je nutná komplexní vnitřní struktura, která má ovšem vyšší hmotnost což je pro závodní vozidlo nežádoucí. Došlo tedy k návratu k provedení s rovnými elementy. Řešení ovšem stále není optimální. V oblastech na blízko bočnic křídlo funguje dobře a nedochází k výraznému odtrhávání mezní vrstvy díky použití gurneyho klapky a 4. elementu. Problémovou oblastí je středová část křídla nacházející se za helmou pilota a její opěrkou, která způsobuje výrazný úplav.

Křídlo bylo navrženo pro fungování ve volném proudění. Vlivem helmy, dochází ve středové oblasti ke změně směru proudění a skutečný úhel náběhu je odlišný. Nejen přítomnost helmy ovšem ovlivňuje fungování křídla. Využitím rovných profilů se kryt motoru nachází poměrně blízko spodní strany prvního elementu. Dochází k interakci oblasti s vyšším tlakem na povrchu krytu a oblasti nižšího tlaku na spodní straně profilu. Obě tyto okolnosti snižují efektivitu křídla a dřívější odtrhání mezní vrstvy v této oblasti.

Pro návrh nového křídla byl použit místo současného profilu NACA 9512 Selig S1223, se kterým máme v týmu pozitivní zkušenosti. Na vozidle je použit na více místech a nabízí lepší poměr  $C_L/C_D$  pro všechny úhly náběhu než současně používaná profil. S nově získanými zkušenostmi ohledně konstrukce vnitřní struktury a schopnosti sestavit dostatečně pevné a lehké zakřivené křídlo bude zvolena tato varianta. Docílí se lepší kooperace krytu motoru a zadního křídla a snížení vlivu úplavu helmy.



*Obr. 2.8 – Zobrazení vířivosti proudění okolo monopostu Dragon X*



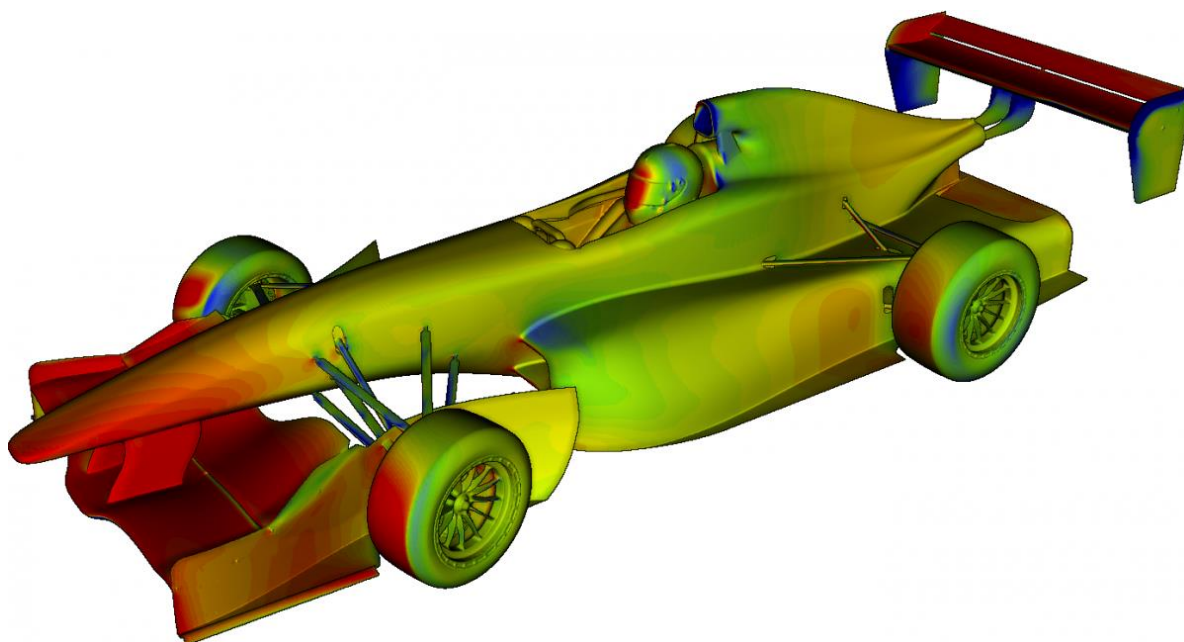
### 3 CFD

CFD neboli computational fluid dynamics je inženýrská disciplína zabývající se modelováním proudění tekutin numerickými metodami. Matematickým základem těchto metod jsou Navier-Stokesovy rovnice. Do dnešního dne ovšem nebyly analyticky vyřešeny. Proto nám CFD není schopno poskytnout přesné řešení, ale pouze přibližné. V posledních letech tato oblast zažila významný růst způsobený rozvojem a zdokonalováním superpočítačů. S pomocí jejich velkého výkonu jsme nyní schopni provádět výpočty náročné na výpočetní čas. [25]

Proces CFD výpočtů lze rozdělit do 3 částí: příprava, řešení, vyhodnocení. Přípravná fáze by se dala charakterizovat jako příprava vstupu do vhodné formy pro CFD: definice domény (prostor ve kterém bude proudění vyšetřováno), tvorba výpočetní sítě (rozdělení domény na konečný počet malých objemů dle určitých požadavků), zadání okrajových podmínek a fyzikálních vlastností tekutiny. Řešič má za úkol integrovat hlavní rovnice popisující proudění v prostoru konečných objemů, jejich diskretizace (převedení výsledných rovnic do systému algebraických rovnic popisující jednotlivé objemy) a následné iterační numerické řešení těchto rovnic. Posledním krokem je vyhodnocení, což je grafické znázornění výsledků za pomoci proudnic, 2D rozložení fyzikálních veličin v řezných rovinách a další. [31]

#### 3.1 POUŽITÍ CFD V MOTORSPORTU

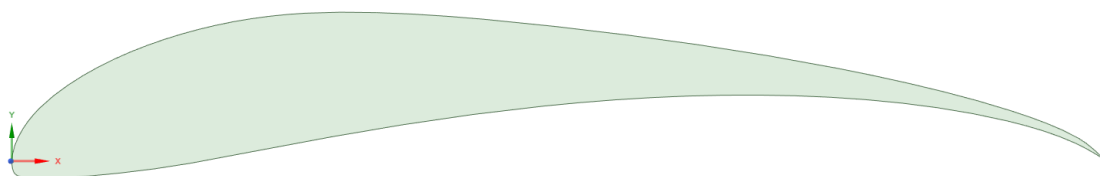
Na počátcích vývoje aerodynamický zařízení na závodních autech byl jediným možným způsobem validace buď testování na trati nebo ve větrném tunelu. Obě tato řešení jsou časově velice náročná, protože vyžadují výrobu a měření je obtížnější. S nástupem CFD došlo v posledních letech k velké časové úspoře. Konstrukteři mohou testovat vnitřní a vnější aerodynamiku vozidel za pomoci virtuálních dvojčat ve virtuálním větrném tunelu. Ve velké míře využívá v raných fázích vývoje vozu k volbě konceptu a optimalizacím. CFD metody ovšem nejsou naprosto přesné a poskytují pouze velmi přibližné výsledky. I v dnešní době zůstává nutností validovat řešení v reálném prostředí.



Obr. 3.1 – Ukázkový příklad výsledků CFD simulací [32]

## 3.2 KALIBRACE VÝPOČETNÍHO MODELU

Před každou simulací je nejprve nutné zkalibrovat výpočetní model. S těmito nastaveními a znalostí chyby simulací je možno přistoupit k dalším krokům. Kalibrace byla provedena na základě experimentálních měření popsanych v publikaci Summary of Low-speed Airfoils Data. Profil použitý pro kalibraci byl vybrán Selig S1223, protože bude použit pro profily zadního křídla, a tudíž minimalizaci výpočetní chyby. Z časových nároků a dostupného výpočetního výkonu bude senzitivní analýza a optimalizace probíhat v 2D prostoru. Pro výpočty byl použit program Ansys Fluent. [33]

ANSYS  
2020 R2

Obr. 3.2 – Detail profilu Selig S1223

### 3.2.1 POPIS EXPERIMENTU

Měření aerodynamických vlastností testovaných profilů probíhala ve větrném tunelu uzpůsobeném pro podzvukové proudění s malými turbulentními víry. Měření byla prováděna v testovací sekci, po převedení do jednotek SI, 880 mm široké, 1219 mm vysoké a 2438 mm dlouhé. Profily, jejichž délka tělvy byla pro všechny případy dlouhá 304,8 mm, byly testovány pro nízké Reynoldsové čísla. Naměřené hodnoty jsou tak velmi závislé na zachování laminárního proudění a zamezení předčasného odtrhávání mezní vrstvy. Pro dosažení těchto podmínek byla v tunelu instalována protiturbulentní clona, která umožnila zachování turbulentní intenzity menší než 0,1 %. [33]

V experimentu byly sledovány bezrozměrné koeficienty vztlaku a odporu. Koeficient vztlaku byl vypočten pomocí síly ve vertikálním směru, která byla zjišťována za pomoci silové rovnováhy. Jedná se v principu o stejný postup, jakým se získává celková síla na profil ve směru osy y. Síly vzniklé vlastní tíhou profilu a měřicích zařízení byly vyváženy závažími, proto nijak měření neovlivňují a nemusí se pro výpočet koeficientů pro kalibraci brát v úvahu. Výpočet odporové síly je poněkud komplexnější. Je řádově menší než síla vztlaková, a proto jejím měření obdobným způsobem by vznikala poměrně velká chyba. Byla proto využita metoda založená na rozdílu tlaku za profilem v dostatečné vzdálenosti, kdy efekt vzniklého úplavu je minimální. [33]

### 3.2.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Aby bylo možné srovnávat experimentálně naměřené hodnoty, je nutné nastavit totožné okrajové podmínky pro simulace. Zadní křídlo monopostu Dragon X je tvořeno profily s délkami tělvy v rozmezí 0,5 až 0,1 m a pracuje v průměrné rychlosti proudění 16,6 m/s. Toto ovšem nejsou podmínky experimentu. V experimentu bylo zkoumáno chování pro různé hodnoty Re. Je nutné zjistit, při jaké hodnotě Re budou elementy zadního křídla provozovány. Charakteristický rozměr byl zvolen 0,2 m, což je přibližná hodnota předpokládané průměrné hodnoty elementů. Výpočet byl proveden pomocí rovnice (1). Hodnoty hustoty vzduchu a dynamické viskozity byly brány z databáze Ansys Fluent pro vzduch o teplotě 15°C.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 16,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,2 \text{ m}}{1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}} = 227\,283 \quad (1)$$

Na základě vypočteného  $Re$ , byly simulované hodnoty porovnávány s měřením při  $Re$  rovnou 200 000. Rychlost proudění vzduchu pro simulaci byla následně dopočítána úpravou rovnice (1) a jako charakteristický průměr byla zvolena délka tětiny profilu použitého při experimentu, viz rovnice (2).

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot d} = \frac{200\,000 \cdot 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,3048 \text{ m}} = 9,5848 \text{ ms}^{-1} \quad (2)$$

Pro kompletní zadání okrajových podmínek, je nutné zadat hodnotu intenzity víření  $I$ , jak již bylo popsáno. Při experimentu rovnala 0,1 % a délka víření  $l$  byla zvolena 10,16 cm, což je tloušťka protiturbulenční clony. [33]

### 3.2.3 TUNELOVÉ KOREKCE

Vlivem měření ve větrném tunelu a blízkosti jeho stěn k profilu dochází ke zkreslení měření. Vznikají tedy fyzikální jevy nazvané: Vztlak (v anglickém jazyce buoyancy), tělesová blokace, úplavová blokace, proudnicové zakřivení. Vztlak a proudnicové zakřivení mají v tomto případě minimální vliv na korekci hodnot, a proto nebudou brány v potaz. Tělesová blokace je způsobena přítomností modelu v testovací sekci, což způsobuje zmenšení efektivní plochy. Jedná se o funkci velikosti modelu a testovacího prostoru popsanou rovnicí (1).  $K_1$  je tunelová korekční konstanta, její hodnota je v našem případě rovna 0,74. Následně bylo nutné vypočítat objem modelu profilu  $M_v$  a obsah testované plochy  $A_{ts}$ . Hodnota  $M_v$  byla zjištěna za pomoci CAD modeláře Creo Parametric, ve kterém byl vytvořen profil a následně zjištěn objem. Ten byl roven hodnotě 0,01978  $\text{m}^3$ . Plocha testovací sekce se jednoduše vypočetla vynásobením výšky a šířky této sekce ve větrném tunelu a je rovna 1,0405  $\text{m}^2$ . Úplavová blokace je výsledkem nižší rychlosti proudění v blízkosti profilu oproti rychlosti okolního proudění. Vliv tohoto jevu je proporcionální k velikosti úplavu a také i zjištěnému koeficientu odporu před provedením korekcí. Její velikost je popsána rovnicí (2), kde  $c$  je délka tětiny profilu (304,8 mm),  $h_{ts}$  je výška testovacího prostoru a  $C_{du}$  je koeficient odporu před korekcí. Pro výpočet výsledných koeficientů vztlaku a odporu, vypočtených pomocí rovnic (3) a (4), je ještě nutné vypočítat hodnotu tunelového korekčního parametru (5). [33]

$$\varepsilon_{sb} = \frac{K_1 \cdot M_v}{A_{ts}^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{wb} = \left( \frac{c}{2 \cdot h_{ts}} \right) \cdot C_{du} \quad (4)$$

$$C_l = C_{lu} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \varepsilon_{sb} + \varepsilon_{wb})^2} \quad (5)$$

$$C_d = C_{du} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{sb}}{(1 + \varepsilon_{sb} + \varepsilon_{wb})^2} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{\pi^2}{48} \cdot \left( \frac{c}{h_{ts}} \right)^2 \quad (7)$$



### 3.2.4 TURBULENTNÍ MODEL

Během kalibrace výpočtového modelu byly porovnávány různé turbulentní modely a případně nastavení jejich koeficientů. Pro simulace celého monopostu je používán model K-omega SST, proto byl první volbou při kalibraci. Kvůli jeho nedostatečné přesnosti byla prozkoumána vhodnost dalších modelů: Spallart-Almaras a K-omega GEKO. Pro kvalitní popsání chování mezní vrstvy je pro tyto turbulentní modely doporučováno  $y^+$  blízké 1. Pro kalibraci bylo použito  $y^+ = 0,5$  pro zajištění požadované hodnoty na celém profilu. [34][35][36]

K-omega SST je dvou rovnicový model odvozený z modelu K-omega BSL, který kombinuje vlastnosti modelů k-omega a k-epsilon. V blízkosti stěn se využívá k-omega a v oblastech vzdálenějších od stěn a volného proudění je použit k-epsilon. K-omega SST zlepšuje předpověď turbulentní viskozity a tím svou robustnost. [35][36]

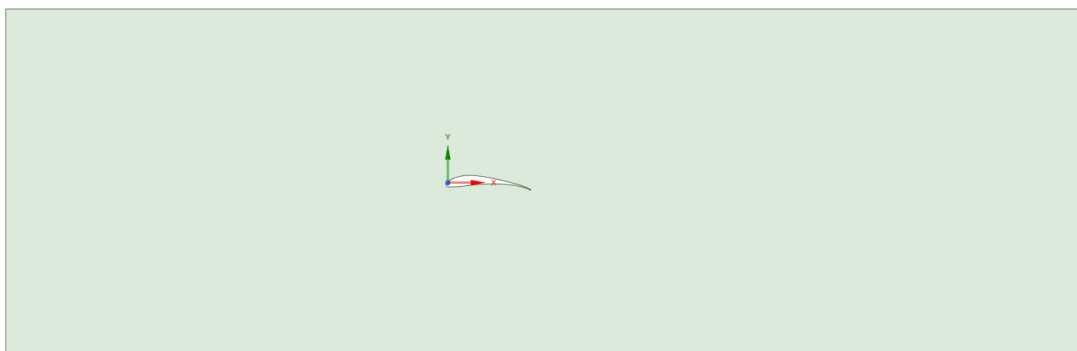
Model Spallart-Almaras je jedno rovnicový model, který byl vyvinut pro letecký průmysl. Je vhodný pro simulace 2D. [35][36]

Každý turbulentní model je vhodný pro popis určitých typů aplikací. Model k-omega GEKO ovšem k tomuto problému přistupuje jinak. Poskytuje možnost změny charakteristických koeficientů bez znalosti modelování turbulence, ztráty kvality a robustnosti. Pro potřeby byl této práce měněn koeficient  $C_{SEP}$ , který ovlivňuje separaci mezní vrstvy. [35][36]

### 3.2.5 GEOMETRIE PRO KALIBRACI

Pro kalibraci výpočetního modelu byla vytvořena geometrie, která co nejvíce napodobuje testovací sekci. Pro 2D simulace byla doména stejně vysoká jako testovací sekce. Pro docílení ustáleného proudění je nutno vytvořit před a za profilem dostatečné množství prostoru. Před profilem byla tedy ponechána vzdálenost přibližně 5násobek délky tělivity a za profilem přibližně její 8násobek. Geometrie profilu byla vygenerována za pomoci stejných bodů, použitých na výrobu testovaných profilů. Jejich souřadnice je možno nalézt v příloze publikace. Experiment sleduje změny koeficientů odporu a vztlaky v závislosti na změně úhlu náběhu profilu, proto byl jako parametr zvolen právě úhel natočení profilu kolem osy z. Jeho hodnoty se pohybovaly v rozmezí  $-10^\circ$  až  $20^\circ$ .

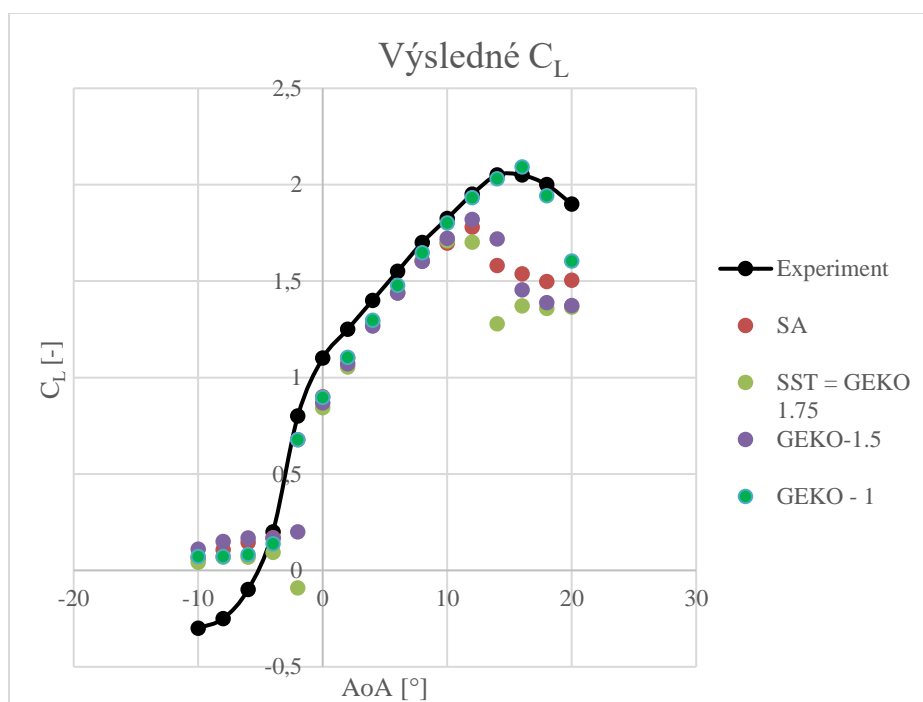
ANSYS  
2020 R2



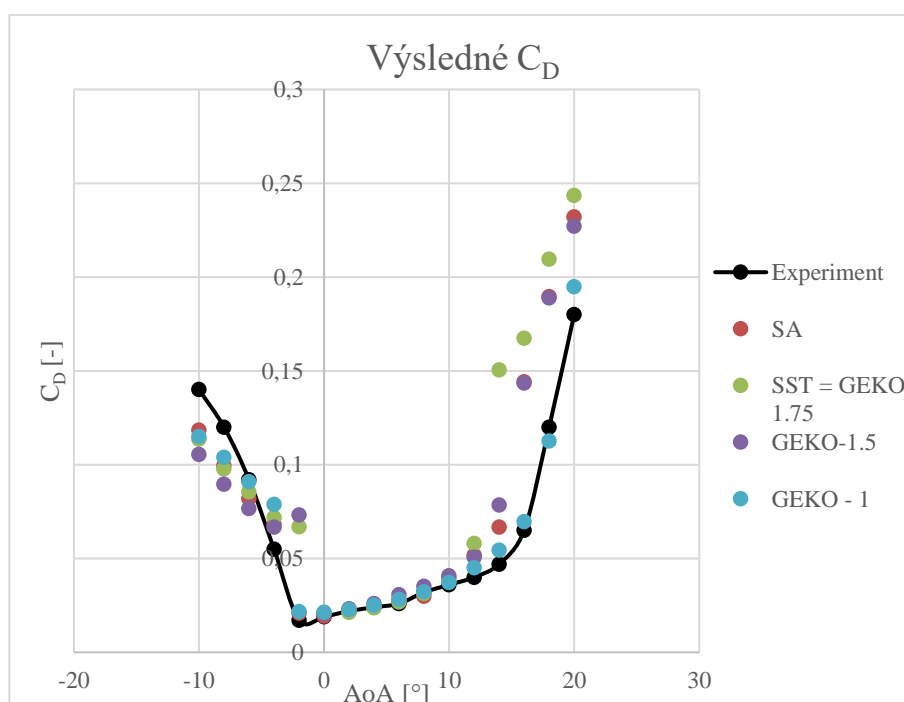
Obr. 3.3 – Geometrie kalibrace výpočetního modelu

### 3.2.6 POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ KALIBRACE VÝPOČETNÍHO MODELU

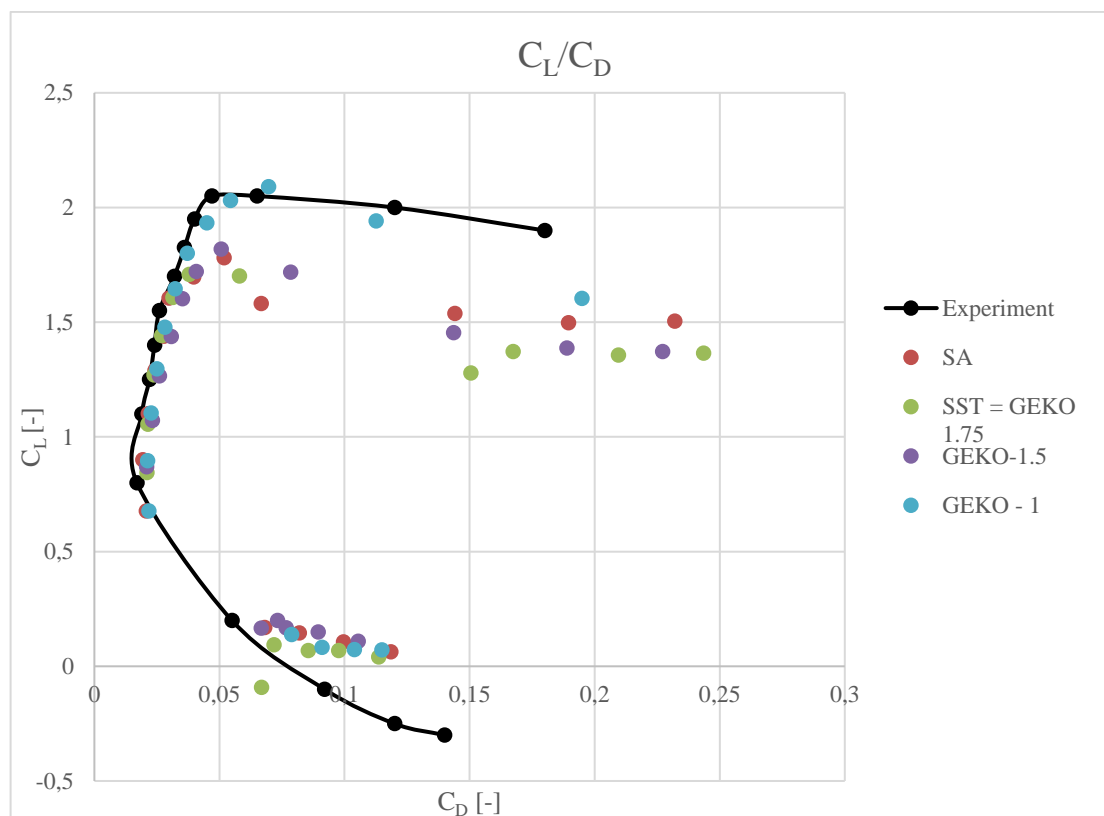
Simulace byly provedeny s využitím různých turbulentních modelů. V případě použití k-omega GEKO byl následně kalibrován i koeficient  $C_{SEP}$ . Bylo využito dostatečně husté výpočetní sítě, aby se zamezilo tvorbě chyb způsobených jejím nedostatečným rozlišením. Byly porovnávány závislosti koeficientů vztlaku i odporu a následně zjištěné poláry.



Graf 3.1 – Závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu



Graf 3.2 – Závislost koeficientu odporu na úhlu náběhu

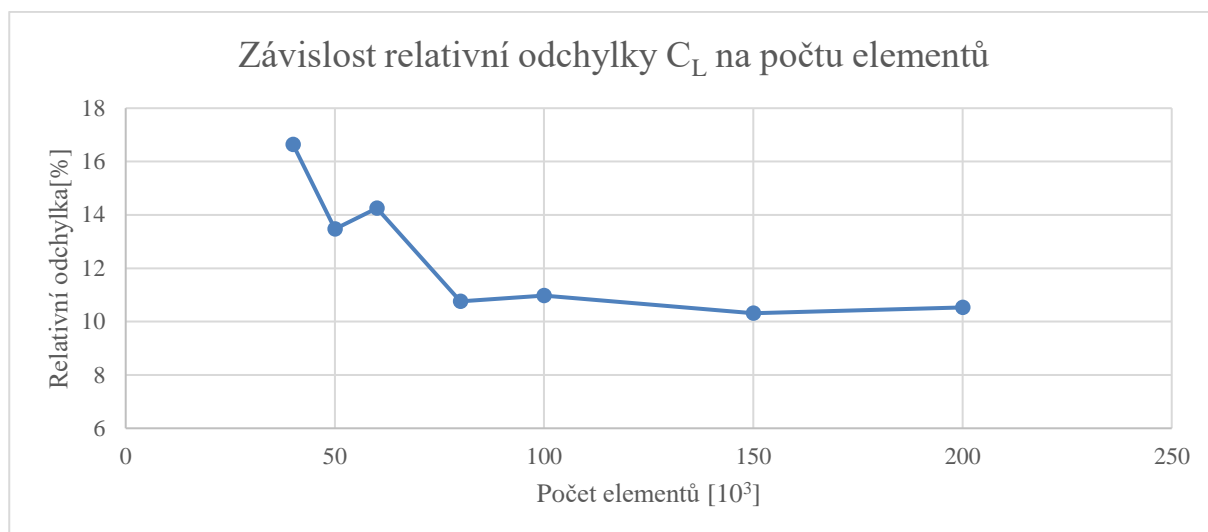


Graf 3.3 – Polára profilu

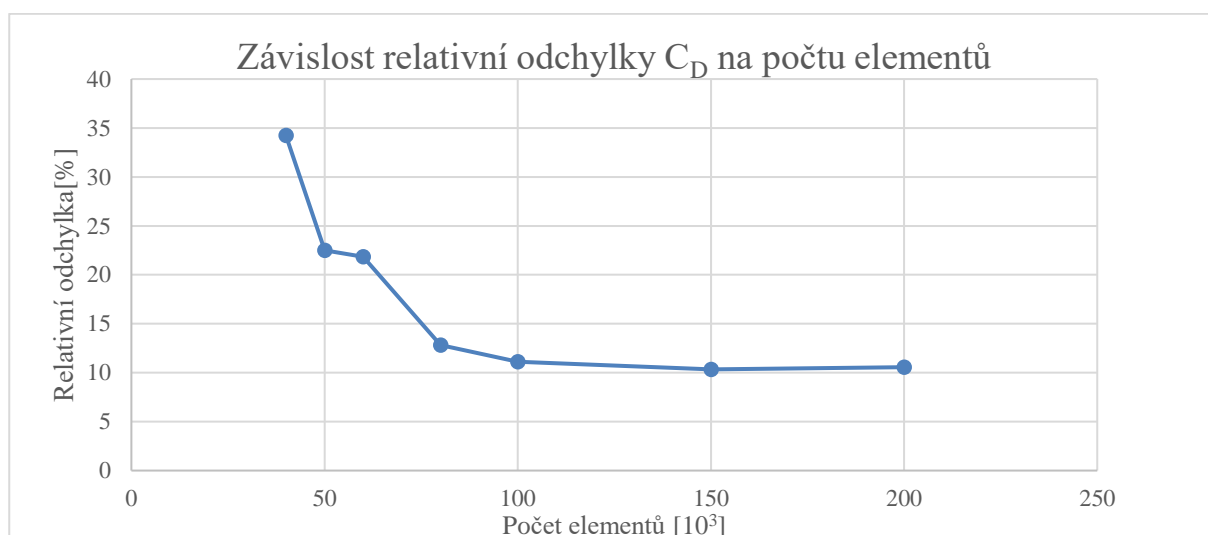
Nejpřesnější chování poskytuje model k-omega GEKO s koeficientem  $C_{SEP}$  roven hodnotě 1. Relativní odchylka koeficientu vztlaku vůči experimentu byla přibližně 10,5 % a koeficientu odporu 11,1 % v celém zkoumané rozsahu úhlu náběhu. Jak je možno vidět na grafu 3.1 dochází k významné degradaci odchylky  $C_L$  v oblasti úhlu náběhu  $-4^\circ$  až  $-10^\circ$ . Tato nepřesnost se může zanedbat, protože profil nebude použit v této konfiguraci.

### 3.3 ANALÝZA ROZLIŠENÍ VÝPOČETNÍ SÍŤ

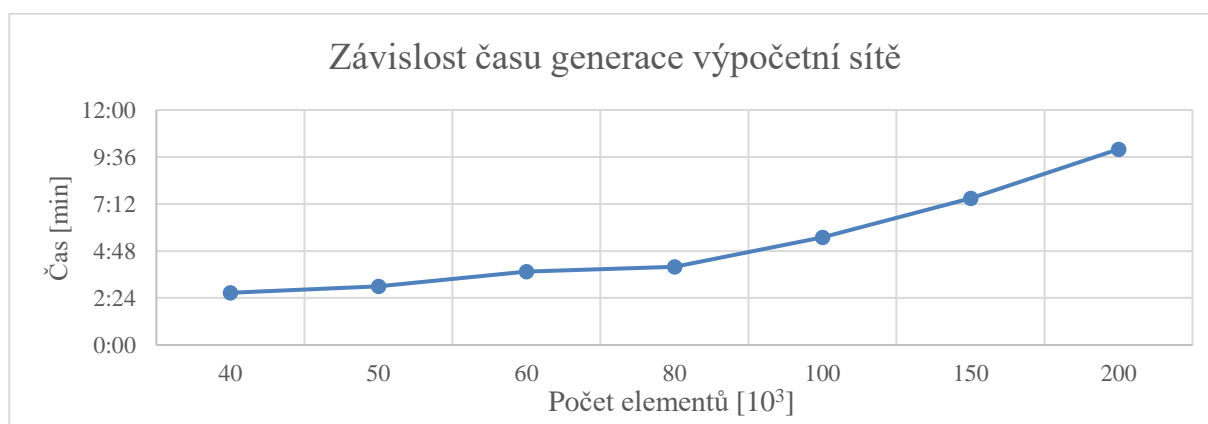
Rozlišení výpočetní sítě je poměrně důležité. Pokud síť nebude dostatečně přesná bude docházet k významné chybě výpočtu. Naopak, pokud je rozlišení výpočetní sítě naddimenzované, byla by její generace časově náročná. Z tohoto důvodu byla provedena analýza změny relativní odchylky sledovaných veličin na rozlišení výpočetní sítě a následně byly porovnány časy potřebné na generaci dané sítě.



Graf 3.4 – Závislost relativní odchylky  $C_L$  na počtu elementů

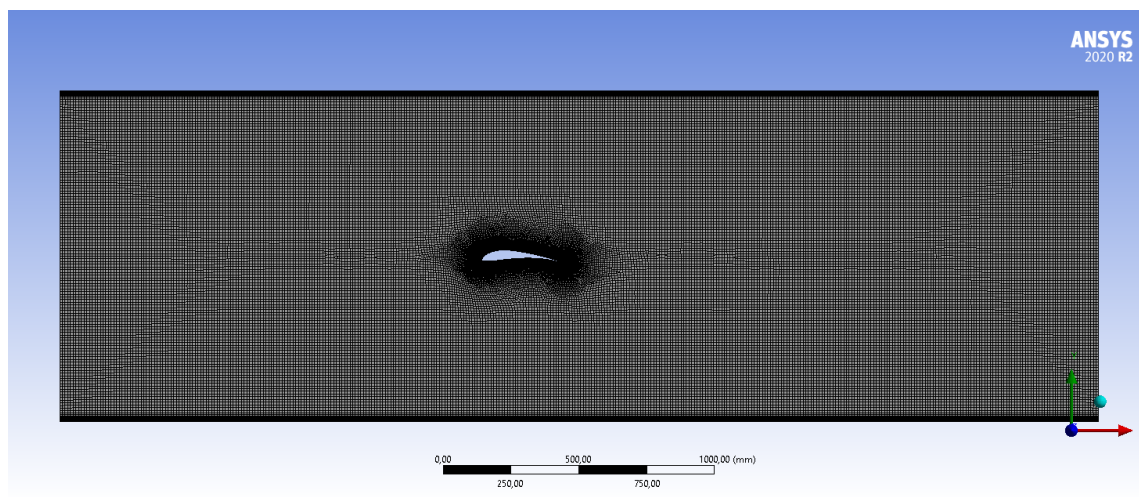


Graf 3.5 – Závislost relativní odchylky  $C_D$  na počtu elementů

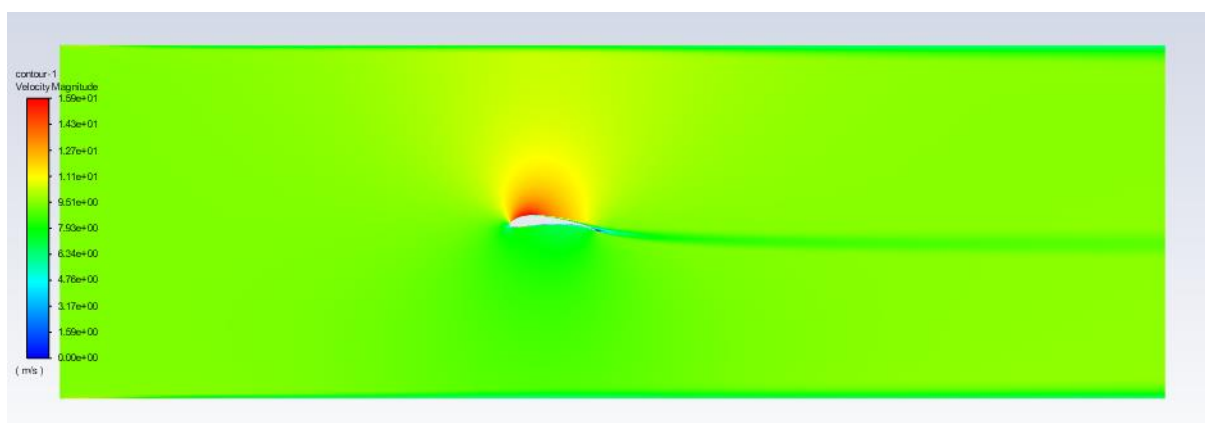


Graf 3.6 – Závislost času generace výpočetní sítě

Relativní chyba u obou koeficientů se ustálila u sítě o 80 000 elementech. Hustější síť nepřináší výrazné zlepšení přesnosti a jejich generace trvá výrazně déle. Pro následující simulace byla použita síť o hustotě 100 000 elementů. Z důvodu plánování použití více-elementového křídla je použita mírně kvalitnější síť pro lepší definici v prostoru mezi navazujícími profily.



*Obr. 3.4 – Výsledná výpočetní síť*



*Obr. 3.5 – Rychlostní pole virtuálního tunelu*

## 4 VÝPOČET

Před přechodem ke statistickému zpracování dat získaných simulacemi je nutné nejprve popsat geometrii (prostor ve kterém bude proudění simulováno), nastavení výpočetní sítě, jejíž kvalita má významný vliv na správnost výpočtu, okrajové podmínky a nastavení řešiče.

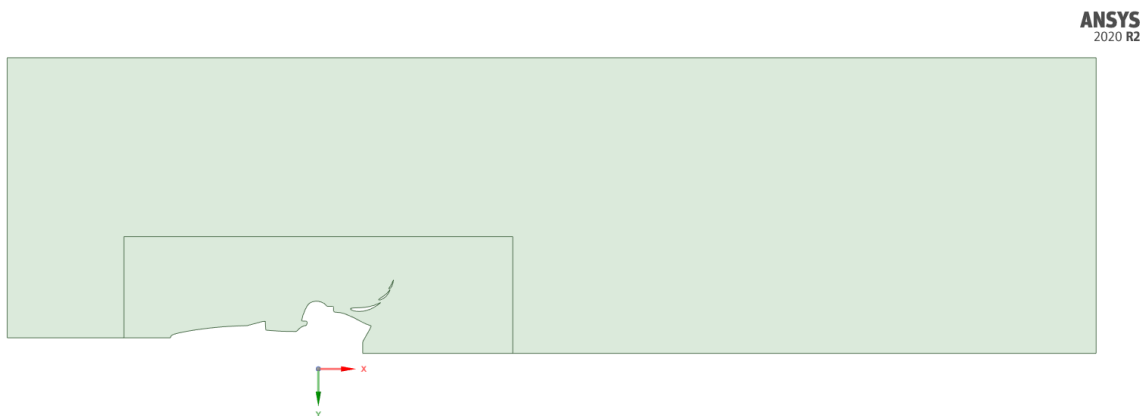
### 4.1 GEOMETRIE

Simulace byly provedeny ve dvou rovinách. První rovinou byla oblast kraje křídla. V této oblasti dochází k volnému proudění vzduchu. Z výpočtu byly proto geometrie vozidla v tomto řezu vynechána. Docílilo se tím snížení počtu elementů a tím pádem času potřebného na výpočet. Stěna vstupní okrajové podmínky byla umístěna 2 m před a stěna tlakového výstupu 8 m za počátek souřadnicového systému, aby bylo dosaženo rozvinutého volného proudění. Výška domény byla 4 m.



Obr. 4.1 – Geometrie krajní oblasti

Geometrie v rovině středu monopostu byla poměrně komplexnější. Zahrnuje i zjednodušenou geometrii vozidla, obzvláště prostor mezi opěrkou hlavy a helmou byl sloučen. Nebyl brán zřetel na vozovku. Její přítomnost neměla významný vliv na chování zadního křídla. Při porovnání simulací s vozovkou a bez ní byl rozdíl 1–2 N přítlaku a 0,1 N odporu ovšem celkový čas potřebný k vytvoření dostatečně kvalitní výpočetní sítě a následnému řešení byl delší o 5 minut. Vzdálenost rychlostního vstupu, tlakového výstupu a výška domény vůči geometrii byly zachovány totožné s variantou v krajní oblasti.



Obr. 4.2 – Geometrie středové části

## 4.2 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Dostatečně kvalitní výpočetní síť je naprosto nezbytná pro získání dostatečně přesných výsledků simulací. Pro nastavení výpočetní sítě bylo využito údajů získaných z analýzy rozlišení výpočetní sítě. V oblasti elementů a zjednodušené geometrie auta je velikost buněk v prostoru totožná s velikostí buněk ve výpočetní síti, která byla shledána jako dostatečná (100 000 elementů). Totožné nastavení bylo použito i pro zjemnění v oblasti hran. I při těchto výpočtech bylo žádoucí docílit  $y^+ = 0,5$ . Velikost první prizmatické vrstvy a jejich počet byl taktéž totožný s kalibrací. Buňky mimo oblast zjemnění byly nastaveny násobně větší. V tomto prostoru dochází k volnému proudění vzduchu, a tudíž jejich velikost nebude mít negativní efekt na výsledek simulace. Docílíme tedy minimalizace výpočetního času. V tabulkách 4.1, 4.2, 4.3 jsou popsány nastavena jednotlivých parametrů.

Tab. 4.1 – Velikosti elementů v daných oblastech

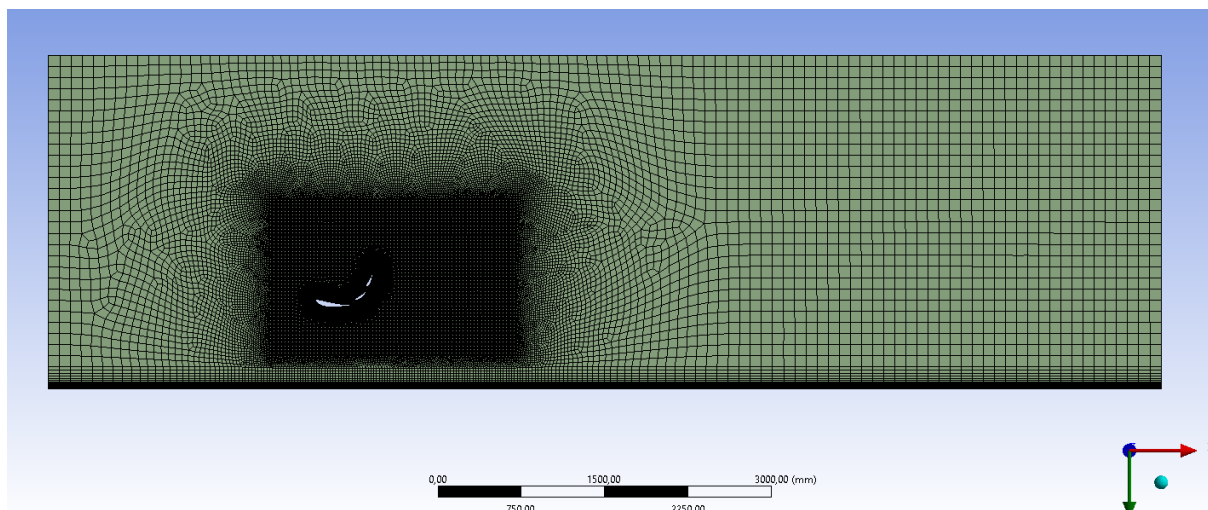
Oblast	Hodnota
Okolí	100 mm
Oblast zájmu	12 mm

Tab. 4.2 – Parametry zjemnění na hranách

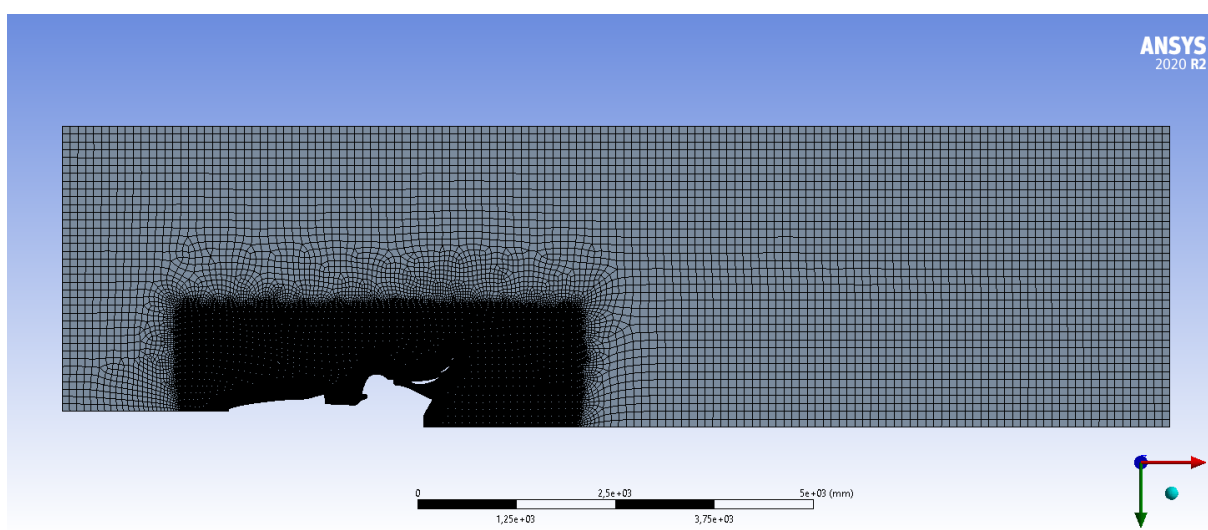
Parametr	Hodnota
Velikost elementu	1 mm
Míra růstu	1,05
Normálový úhel zaoblení	10°
Lokální minimální velikost	0,1 mm
Minimální velikost blízkosti	0,01 mm
Počet buněk napříč mezerou	50

Tab. 4.3 – Nastavení prizmatických vrstev

Parametr	Hodnota
Výška první vrstvy	0,0275 mm
Počet vrstev	30
Míra růstu	1,1



Obr. 4.3 – Výpočetní síť krajní oblasti



Obr. 4.4 – Výpočetní síť středové oblasti

### 4.3 ŘEŠIČ

Jako turbulentní model byl na základě kalibrace výpočtového modelu, zvolen  $k-\omega$  GEKO s koeficientem  $C_{SEP}$  na hodnotě 1, pro svoji přesnost. Jak ukázala kalibrace, tento model se nejvíce blížil experimentálnímu měření z větrného tunelu. Pro kompletní popsání problému je nutné zadat správné okrajové podmínky. Rychlost proudění vzduchu byla nastavena na hodnotu 16,6 m/s, což je průměrná rychlost monopostu FS na trati. Popis turbulencí byl ponechán totožný s nastavením z kalibrace výpočtového modelu. Kompletní nastavení výpočtu je možno nalézt v tabulkách 4.4 a 4.5. Při simulacích v krajních polohách křídla byla do výpočtu taktéž zahrnuta vozovka. Byla definována jako pohybující se stěna. V případě výpočtu ve středové rovině, naopak z časové náročnosti výpočtu a generování sítě byla vozovka vynechána. Při porovnání výpočtu s vozovkou a bez ní, byl rozdíl vztahové síly a odporové síly zanedbatelný.



Tab. 4.4 – Nastavení modelu a fyzikálních vlastností řešiče

<b>Typ</b>	Pressure-Based
<b>Čas</b>	Steady
<b>Model</b>	Viscous
<b>Turbulentní model</b>	k-omega
<b>k-omega model</b>	GEKO
<b>CSEP</b>	1

Tab. 4.5 – Okrajové podmínky výpočtu

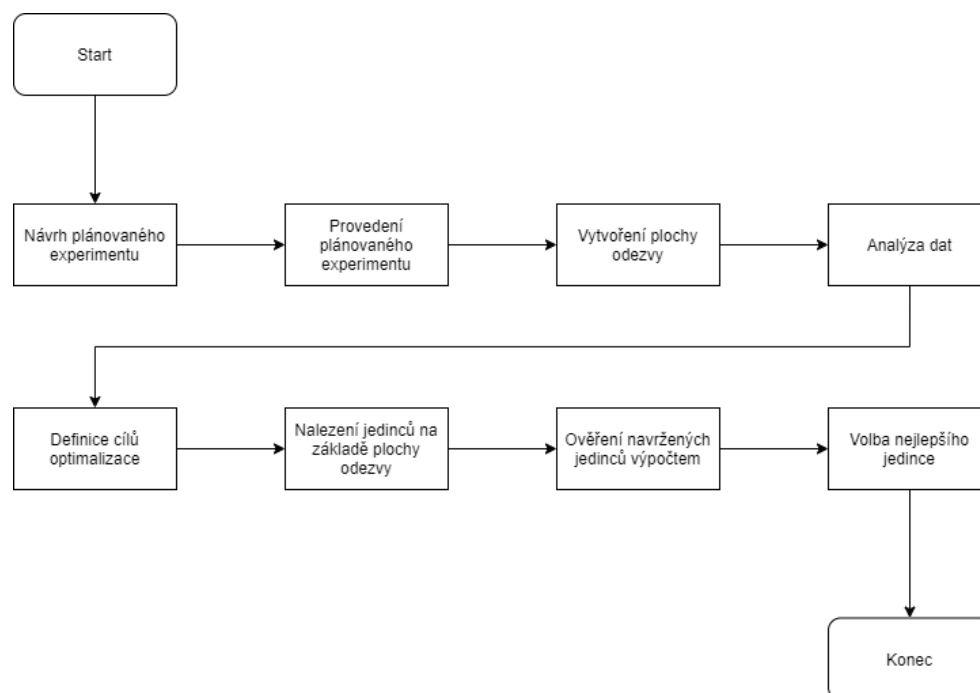
<b>Rychlostní vstup</b>	
<b>Rychlost</b>	16,6 m/s
<b>Tlakový výstup</b>	
<b>Operační tlak</b>	0 Pa
<b>Turbulence</b>	
<b>Intenzita víření</b>	0,1 %
<b>Délka víření</b>	0,1016 m

## 5 OPTIMALIZACE

### 5.1 VOLBA METODY

Optimalizačních metod je celá řada. Je proto nutné zvolit takovou, která je vhodná pro daná potřeby. V oblasti aerodynamického návrhu se často využívají gradientní a genetické algoritmy, metoda plochy odezvy a v krajních případech metody hrubé síly. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Gradientní a genetické algoritmy jsou jednoduché na implementaci a provedení. Jejich výsledkem ovšem nemusí být nalezení globálně ideálního řešení. Mají tendenci směřovat k lokálním extrémům a jejich přesnost je silně závislá na počátečních/vstupních datech. Metoda plochy odezvy je metoda robustní a umožní nám nalézt oblast globálního maxima nebo minima. Další výhodou této metody je možnost získání informací o vzájemných vztazích jednotlivých vstupních parametrů a jejich vlivu na výsledné sledované veličiny. [37][38]

Pro potřeby této práce byla využita metoda plochy odezvy. Celý proces probíhal v prostředí Ansys Workbench, který má v sobě obě metody integrované. Jejich použití tedy bylo velmi jednoduché. Grafické znázornění jednoho průběhu je možno vidět na obr. 5.1.



Obr. 5.1 – Diagram optimalizačního procesu

#### 5.1.1 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT

Plánovaný experiment (v anglické literatuře Design of Experiment) je statistická metoda, pomocí které se získávají data pro následnou analýzu daného problému. Kvalita plánovaného experimentu je zásadní, protože ovlivňuje množství nutných dílčích experimentů pro dostatečný popis vlivu vstupních parametrů na výstupních. Základní principy plánovaného experimentu jsou: znáhodnění, replikace a blokování. [38][39][40]

## **ZNÁHODNĚNÍ**

Znáhodnění neboli randomizace, je základním pilířem používaným většinou statistických metod pro vyhodnocení naměřených dat. Statistické metody vyžadují, aby vstupní parametry byly rovnoměrně a nezávisle rozloženy ve zkoumaném prostoru. Správným znáhodněním experimentů je možné zaručit omezení vlivu vnějších faktorů, které mohou být obtížně identifikovatelné, nebo jejich kontrola je z různých důvodů nemožná. Znáhodnění zaručí střídání úrovní, nebo kombinací úrovní zkoumaných veličin a pořadí provedených měření bude zcela náhodné. Díky tomu je dopad systematických vlivů značně omezen. Jinak řečeno, vliv některého vstupního parametru nebude zvýhodněn proti jinému. Tím je zaručena vzájemná nezávislost jednotlivých měření. V počítačových programech je těchto podmínek docíleno implementací generátorů náhodných čísel do algoritmů plánujících experimenty. [39]

## **REPLIKACE**

Replikace je proces, při kterém dochází k nezávislému opakování základního experimentu, nebo jeho dílčí části za určitých podmínek. Opakování experimentů je nutné pro měření variability náhodné složky a možnosti ji oddělit od variability způsobené střídáním úrovní zkoumaných parametrů. Replikace má dvě základní složky. [39]

První složka umožňuje získat přesnější odhad chyby experimentu, čímž je myšlen rozdíl mezi stejnými experimenty provedenými za totožných podmínek. Chyba se pak stává základní jednotkou měření, pomocí které je možné určit, zda jsou tyto rozdíly statisticky různé. Druhá složka je možnost získání výrazně přesnějšího odhadu vlivu jednotlivých faktorů mezi sebou. [39]

Je nutné rozeznávat rozdíl mezi replikací a provedením opakovaného měření. Opakovaným měřením se rozumí více měření jednoho experimentu. Je nutno provést více experimentů a ty následně změřit. [39]

## **BLOKOVÁNÍ**

Blokování je návrhová technika zlepšující přesnost, se kterou se provádí porovnání měřených faktorů. Experimenty bývají často časově velmi náročné. Není možné je provést během jednoho časového úseku, se stejnými podmínkami, jež není možno ovlivnit stejnými operátory měřících zařízení. Tyto vlivy se nazývají nežádoucí faktory a zpravidla jejich vliv není oblastí zájmu. Hlavním cílem blokování je eliminace těchto nežádoucích proměnlivostí. Je to uspořádání experimentů do bloků s podobnými podmínkami nikoli však stejných. [39]

### **5.1.2 METODA PLOCHY ODEZVY**

Metoda plochy odezvy (v anglickém jazyce Response Surface Method) je kolekce matematických a statistických technik, používaných pro modelování a analýzu problému. Cílem je pomocí plánovaného experimentu optimalizovat odezvu (výstupní hodnota), která je ovlivněna nezávislými proměnnými (vstupní parametry). Metoda omezuje vznik numerických chyb způsobených vnějšími vlivy. Tato odezva lze následně modelovat v n-rozměrném prostoru jako plochu. [38][39]

Z matematického hlediska se výsledek experimentu dá pospat rovnicí (8) a (9), kde  $y$  je hodnota výsledné sledované veličiny, která je funkcí všech vstupních proměnných a ruchem, nebo také nazývaného chybou sledování. Značící se  $\varepsilon$ . Pokud se tento ruch zanedbá, nebo se

považuje za konstantní napříč celým prostorem a funkce těchto proměnných označena  $\eta$ , pak plocha, která je popsána touto funkcí se nazývá plochou odezvy. V případě nízkého počtu proměnných (maximálně 2), lze tuto plochu graficky znázornit. Pokud je ale problém popsán více parametry je nutné zbylé parametry nastavit na určitou hodnotu, výsledná plocha v tomto případě je pomyslným řezem celé plochy odezvy. [38][39]

Vztah mezi výslednými a vstupními faktory je většinou neznámý. Je proto nutné ho aproximovat. Jeden z nejběžnějších způsobů aproximace je polynom prvního stupně ve tvaru (8). [38]

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \epsilon \quad (8)$$

Dalším často používaným modelem, který v sobě zahrnuje i zakřivení povrchu, je aproximace polynomem druhého řádu ve tvaru (9). [38]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \epsilon \quad (9)$$

Pro valnou většinu problémů, kde je použita plocha odezvy jsou tyto modely dostatečně přesné. Většina případů nemá povahu polynomické funkce a jedná se o aproximaci, při které může dojít k velké chybě. [38]

### 5.1.3 CÍLEM ŘÍZENÁ OPTIMALIZACE

Cílem řízená optimalizace (v anglickém jazyce Goal Driven Optimization) je soubor omezených, více-úkolových optimalizačních algoritmů nabízených prostředím Ansys Workbench. Ty mají za cíl nalézt nejlepší možný návrh, splňující definované cíle na základě dat získaných z plochy odezvy. Dostupné metody jsou: Screening, MOGA, NLPQL, MISQP, Adaptive Single-Objective, Adaptive Multiple Objective. Pro potřeby této práce byla použita metoda MOGA, která je doporučována při použití více než jednoho kritéria a své dobré nastavitelnosti, bude podrobně vysvětlena pouze její podstata. Informace o zbylých metodách lze najít v dokumentaci Ansys DesignXplorer. [40][41]

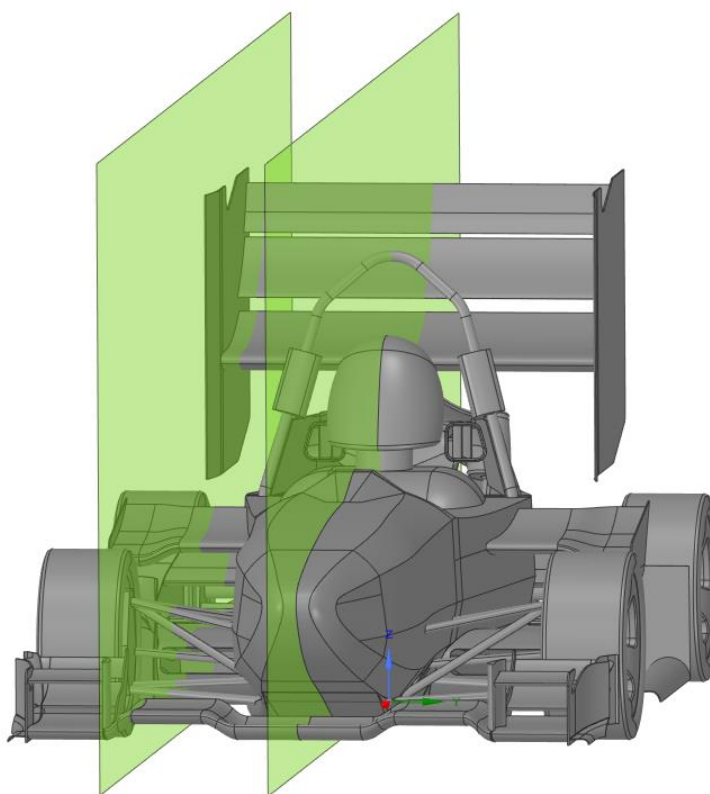
Více-úkolové genetické algoritmy (anglicky Multi-Objective Genetic Algorithms od tohoto zkratka MOGA) jsou metody odvozené od základních genetických algoritmů, které kvalitu jednotlivců vyhodnocují podle hodnoty fitness získané z fitness funkce. Jsou tedy schopny posuzovat kandidáty na základě více různých kritérií, což bylo vhodné pro potřeby této práce. [37][42]

Pro pochopení, jak fungují genetické algoritmy s více než jednou výstupní proměnou, která se má optimalizovat, je důležité pochopit princip Paretoovy dominance. Pokud využíváme více cílů než jeden, je velice obtížné, ne-li nemožné, nalézt jedno ideální řešení. Místo toho za nejlepší řešení, někdy nazývané pareto, je skupina řešení, které požadovaná kritéria splňují do určité míry. To znamená, že pokud vybereme jednoho kandidáta z této skupiny, bude se tak blížit cíli jednoho kritéria více na úkor druhého. Ansys Workbench proto definuje veličinu: maximální dovolený paretoův podíl, která sleduje podíl paret v dané populaci. Pokud je tato hodnota splněna, řešení se považuje za zkonvergované. [42]

## 5.2 PROCES OPTIMALIZACE

Zadní křídlo se nachází v zadní části monopostu. Ovlivněno je tak celou geometrií vozidla. Nabízí se tedy využít 3D simulací a provést optimalizaci s geometrií celého auta a docílit tak velmi přesného výsledku. Výpočetní náročnost těchto výpočtů je ale velmi vysoká a z časového hlediska nemožná pro účely této práce. Využití symetrie vozidla, zmenšení domény a posunutí rychlostního vstupu zkoumané oblasti, při využití rozložení rychlostí proudění na vstupu získaného ze simulací celého auta, nám neposkytne dostatečnou redukci výpočetních nároků. Využití jednodušších 2D simulací bylo nezbytné při akceptovatelné chybě.

Pro co nejbližší přiblížení 3D proudění optimalizace probíhala v rovině symetrie vozidla. Je to rovina, ve které je proudění významně ovlivněno úplavem od helmy řidiče. Poté byl celý proces zopakován pro rovinu vzdálenou 400 mm od roviny symetrie. V této rovině je proudění nejméně ovlivněno geometrií vozidla a dá se považovat za volné proudění. Pro každou rovinu bude proveden plánovaný experiment, vytvořena plocha odezvy (citlivostní analýza) a následně provedena optimalizace na základě metody plochy odezvy a přímá optimalizace.

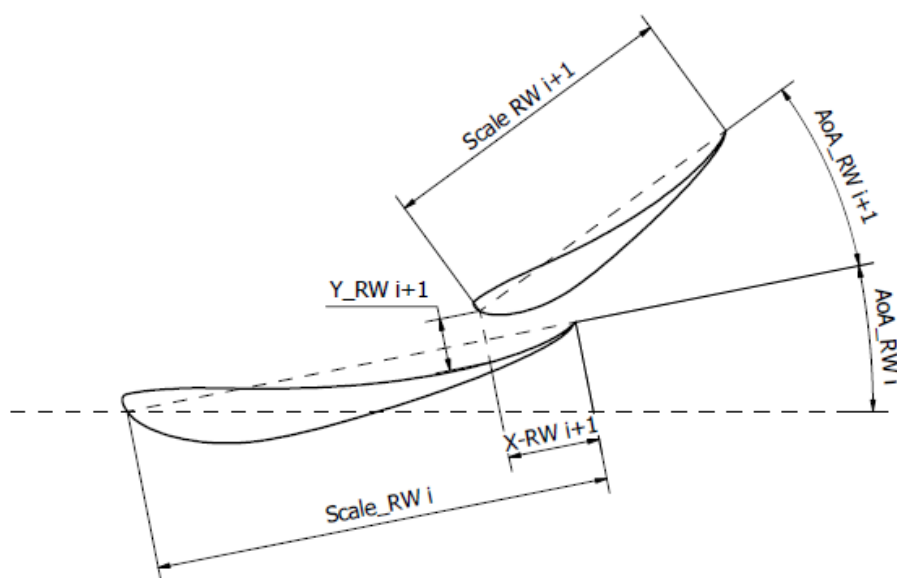


*Obr. 5.2 – Zobrazení rovin, ve kterých bude probíhat proces optimalizace*

## 5.3 VOLBA PARAMETRŮ

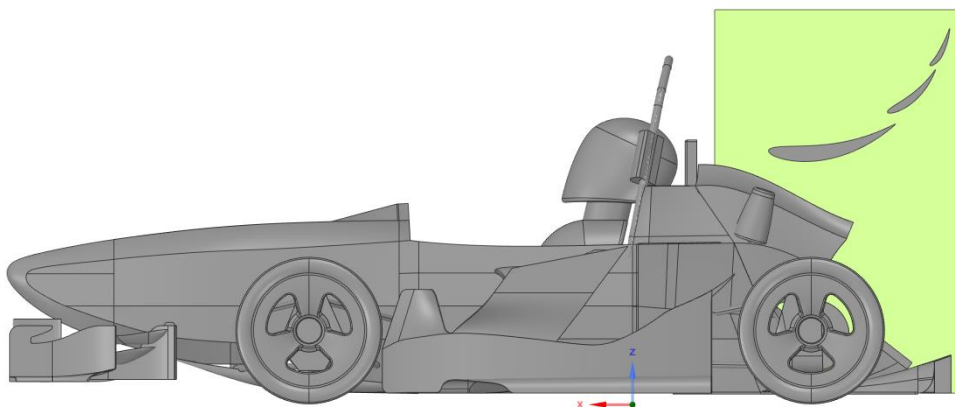
Celý optimalizační proces byl proveden ve dvou smyčkách. Způsob definování geometrie byl ale totožný. Zadní křídlo mělo 3 elementovou konfiguraci. Kompletní definice tvaru a polohy jednotlivých profilů byla možná za pomoci 4 parametrů: délka tělivy, úhel náběhu, X a Y souřadnice náběžné hrany. Pro automatizaci byla ale definice polohy elementu čistě pomocí X

a Y souřadnice velmi nevhodná. Mohlo dojít k chybné volbě parametrů, profily by se protínaly a celý výpočet této varianty by skončil chybou. Z tohoto důvodu byla poloha elementu definována pomocí polohy náběžné hrany následujícího profilu odtokové hrany a horního potahu profilu. viz obr. 5.3. Aproximace tvaru horního potahu profilu byla provedena za použití metody nejmenších čtverců. Úhly náběhu byly také brány jako relativní vůči předešlému profilu.



Obr. 5.3 – Schematické znázornění parametrů

Pro jednotlivé smyčky průběhu celého cyklu byly parametry zvoleny tak, aby pokryly co největší prostor a zároveň neprobíhaly simulace v oblastech které nejsou důležité a principiálně nedávají smysl viz tabulka 5.1. Parametry Scale\_RW1 (Scale\_RW2, Scale\_RW3) definují délky tětiv profilů jako poměr vůči profilu o délce 1 m, AoA\_RW1 (AoA\_RW2, AoA\_RW3) relativní úhly náběhu, X\_RW1 (X\_RW2, X\_RW3) posun ve směru definovaném odtokovou a náběžnou hranou předešlého elementu, Y\_RW1 (Y\_RW2, Y\_RW3).



Obr. 5.4 – Rozměrová obálka dovolená pravidly

Bylo nutné zajistit, aby se všechny profily vždy vyskytovaly v obálce definované pravidly soutěže. Toho bylo docíleno pevně danou polohou odtokové hrany posledního elementu tak, aby se vyskytovala v co nejvyšším a nejvzdálenějším bodě. Byla ovšem ponechána rezerva 5 cm od obou mezí, kvůli přesnosti výroby a rezervě pro úpravu jízdní výšky. K porušení obálky mohlo dojít i v určitých krajních případech (například dlouhé profily a nízké relativní úhly náběhu). V tomto případě byla poloha X souřadnice náběžné hrany prvního elementu rovna maximální dovolené hodnotě polohy X a délka tělavy byla nastavena na spodní hranici povoleného rozsahu. Tento přístup byl zvolen pro znevýhodnění případů, kdy k tomuto jevu dojde, ale ne tolik, aby se výrazně deformoval tvar plochy odezvy. Výstupní parametry byly v obou případech hodnoty součtu přitlačných a odporových sil působící na všechny elementy.

Tab. 5.1 – Rozsahy jednotlivých parametrů

Název parametru	Rovina symetrie		Rovina oblasti volného proudění	
	Minimum	Maximum	Minimum	maximum
Scale_RW1 [-]	0,4	0,55	0,45	0,3
AoA_RW1 [°]	-3	10	-3	3
Scale_RW2 [-]	0,15	0,35	0,1	0,25
AoA_RW2 [°]	5	40	5	35
X_RW2 [mm]	0	60	0	60
Y_RW3 [mm]	35	90	20	90
Scale_RW3 [-]	0,1	0,2	0,1	0,2
AoA_RW3 [°]	5	40	5	30
X_RW3 [mm]	0	60	0	60
Y_RW3 [mm]	25	70	20	70

## 5.4 PLOCHA ODEZVY

Než bylo možno přistoupit k optimalizaci, či analýze vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výsledné hodnoty bylo nejprve nutno provést plánovaný experiment a vytvořit plochu odezvy.

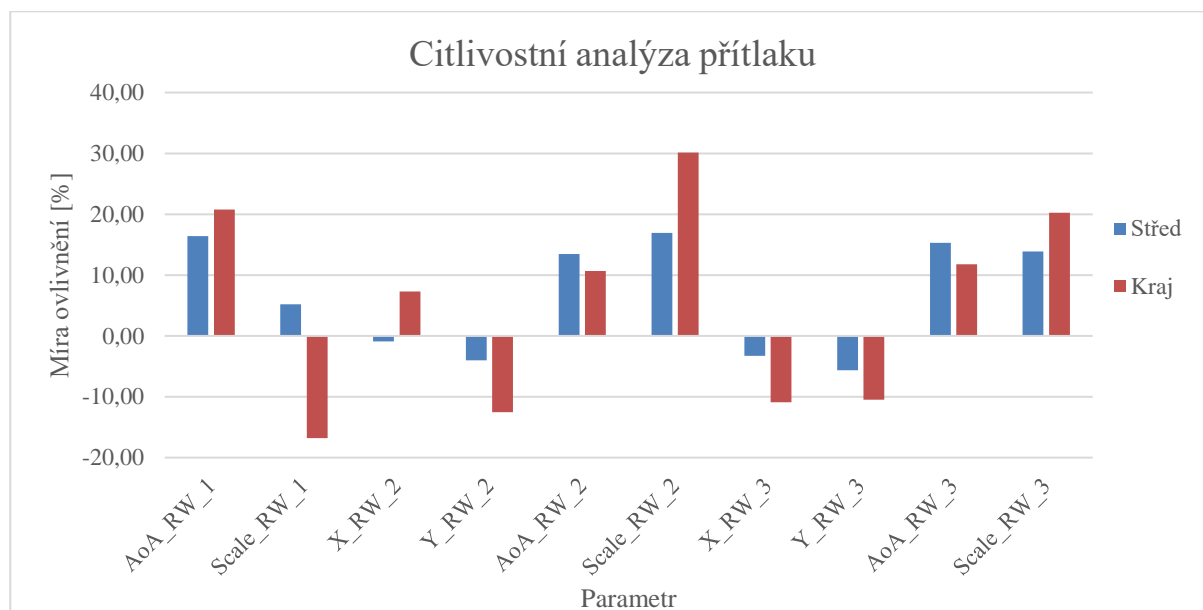
Jak již bylo zmíněno, plánovaný experiment rozvrhne simulace v prostoru definovaném rozsahy jednotlivých parametrů. Prostředí Ansys Workbench nabízí několik algoritmů, podle kterých byly jednotlivé kombinace parametrů navrženy. Pro naše potřeby byl použit algoritmus nazvaný: Optimálně prostor vyplňující návrh (anglicky Optimal space-filling design) pro jeho rovnoměrné rozložení bodů po celém prostoru. Pro tento případ to bylo vhodné, nedošlo k zhuštění navržených experimentů v oblastech, které nemusely být důležité, a naopak kritické oblasti nebyly dostatečně popsány. Algoritmus nabízí volbu celkového

počtu kombinací, která byla nastavena na hodnotu 700 v obou případech. Toto množství poskytovalo dostatečně kvalitní popis problému s přijatelně malou chybou. Tento počet šlo samozřejmě dále rozšířit vložení tzv. zdokonalujících bodů. Proces bylo možné opakovat dále ovšem při navýšení počtu jednotlivých kombinací nedošlo k výraznému zlepšení kvality plochy odezvy.

Po provedení plánovaného experimentu došlo k vytvoření plochy odezvy. Typ plochy byl vybrán: Standart Response Surface – Full 2nd Order Polynomials. Jedná se o plochu odezvy druhého řádu. V obou cyklech se sledovaly dva výstupní parametry. Pro každý je vytvořena plocha odezvy zvlášť. Proces tvorby plochy je řízen programem Ansys Workbench a bylo tak nemožné získat hodnoty jednotlivých koeficientů. Bylo možné vytvořit funkci plochy odezvy externě, ovšem tímto bychom se připravili o možnost jednoduchého zpracování informací: citlivostní analýza, vliv jednotlivých parametrů a jejich grafické znázornění na výsledné sledované hodnoty atd. [40][41]

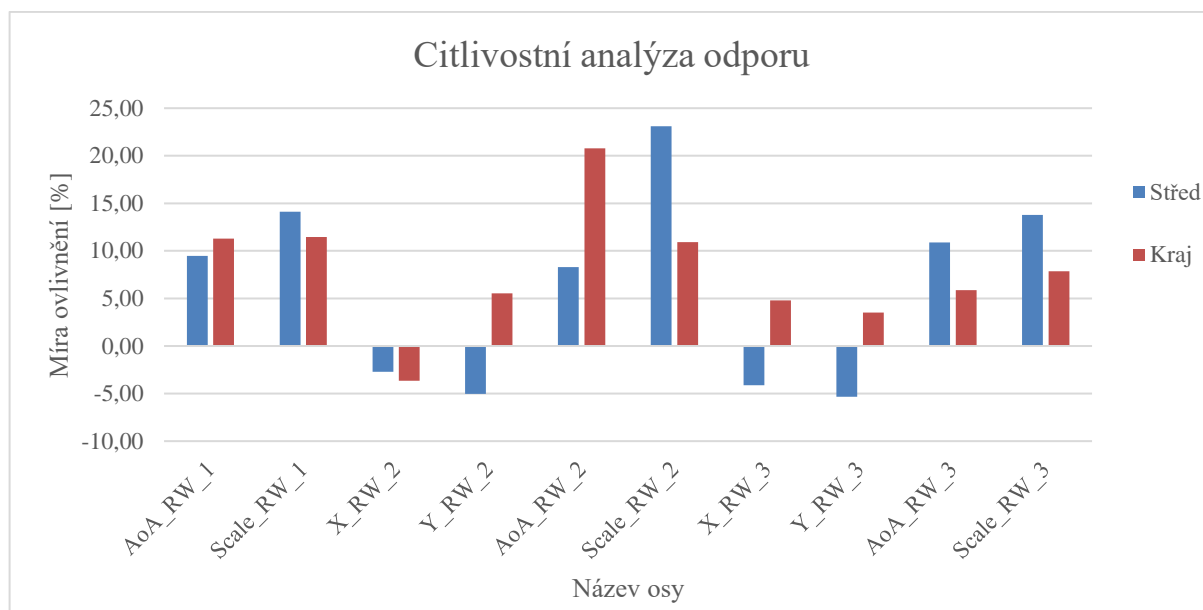
## 5.5 ANALÝZA DAT Z PLOCHY ODEZVY

Po vytvoření plochy odezvy bylo možné analyzovat data z ní získaná. Jednou z nejdůležitějších analýz je citlivostní analýza, která poskytuje představu o vlivu změn jednotlivých vstupních parametrů na celkovou změnu výstupních hodnot. Grafické znázornění tohoto vlivu je možno nalézt v grafech 5.1 a 5.2. Pokud při zvýšení daného parametru došlo ke zvýšení výstupního parametru byla hodnota kladná, pokud došlo ke snížení byla záporná. Výška sloupce znázorňuje jednotlivé míry vlivu. [40][41]



Graf 5.1 – Citlivostní analýza přitlaku





*Graf 5.2 – Citlivostní analýza odporu*

Jak je možno vidět, nejvýznamnější vliv na celkový přítlak i odpor měly parametry úhlu náběhu a délky tětiny jednotlivých profilů. Mezery mezi elementy a jejich vzájemné posunutí mělo menší význam, pokud se ovšem neblížily krajním hodnotám, kdy docházelo k uzavření mezery, a tak k výraznému zhoršení vlastností. Ze znalosti fungování více-elementového křídla lze očekávat, že vliv úhlů náběhu a tětin, obzvláště prvního elementu, má nejvýznamnější vliv na hodnotu celkového přítlaku. Jak ukazuje graf 5.1, největší vliv měly v obou případech délka tětiny 2. elementu. Bylo to způsobeno velikostí obálky geometrie danou pravidly, kdy při navýšení délky tětiny prvního elementu docházelo k jejímu přesáhnutí a tato geometrie byla uměle degradována a tím i snížen vliv tohoto parametru. Úhel náběhu prvního elementu ovlivňoval úhly náběhu zbylých elementů, jelikož jsou vždy relativní vůči předešlému elementu. Pokud se zvyšoval úhel náběhu prvního elementu a zbylé parametry zůstaly nezměněny, došlo v podstatě ke změně úhlu náběhu křídla jako celku. Je proto pochopitelné, že úhel náběhu prvního elementu měl větší význam v porovnání s úhly zbylých profilů. [12]

Při pohledu na graf 5.2 citlivostní analýzy pro odpor je možné si všimnout výrazné odlišnosti významu vlivu úhlu náběhu a délky tětiny druhého elementu. V krajní rovině bylo v simulacích křídlo vystavené volnému proudění a nebylo nijak ovlivněno okolím, naopak část křídla ve středové rovině ano. Zvýšením délky tětiny druhého elementu se vlivem definice geometrie, pomocí pevného umístění odtokové hrany 3. elementu, přiblížilo křídlo krytu motoru. Mezera mezi nimi se zmenšila a vzduch proudící na spodní straně křídla neměl dostatečnou energii a mezní vrstva se tak odtrhávala dříve. Na rozdíl od toho, pokud se uvažoval krajní řez, hlavní vliv na odtrhnutí mezní vrstvy mělo celkové zakřivení křídla, což bylo důvodem výrazného vlivu tohoto parametru. [12]

Získané informace lze shrnout do pár základních doporučení pro budoucí návrh zadního přítlačného křídla pro monopost FS. Pro dosažení maximálního přítlaku je nutné klást hlavní důraz na maximální možné vyplnění prostorové obálky za pomoci délky tětiny a úhlu náběhu jednotlivých elementů. Mezery a překrytí elementů jsou až sekundárními faktory. Není ovšem možné pouze maximalizovat jednotlivé parametry. Celé křídlo by poté bylo

rozměrově velké s výrazným celkovým zakřivením. Důsledkem by bylo dřívější odtrhávání mezní vrstvy, nárustu odporu a poklesu přítlaku. Je nutné najít určitý kompromis, který je však závislý na charakteristice celého aerodynamického paketu a efektu, kterého chce konstruktér docílit.

## 5.6 OPTIMALIZACE NA ZÁKLADĚ METODY PLOCHY ODEZVY

Na základě vytvořených ploch odezvy bylo možné pomocí cílem řízené optimalizace, nalézt body, které splňovaly dané požadavky. Díky hledání vhodných kandidátů na základě metody plochy odezvy, ne postupnými jednotlivými simulacemi, jsme byli schopni rychle nalézt vhodné kandidáty pro různé požadavky. V následující sezóně je plánován přechod ze spalovacího na pohon elektrický. Je pravděpodobné, že aerodynamické prvky budou navrženy s ohledem na jiné konstruktérské cíle. Zatím ovšem neproběhla citlivostní analýza a zjištění vlivu jednotlivých faktorů na vozidlo, byly proto uvažovány 3 možnosti: maximální efektivita křídla, minimalizace odporu při zachování současného přítlaku a maximalizace přítlaku při zachování současné hodnoty odporu. Tyto cíle byly zjišťovány pro obě konfigurace výpočtů.

Cílem řízená optimalizace za pomoci MOGA algoritmu našla požadovaný počet kandidátů. Ty se následně výpočtem ověřili pro zjištění chyby predikce. Vždy bylo vygenerováno 50 kandidátů, ze kterých se vybral ten nejvhodnější. Než bylo však možné optimalizaci spustit, bylo nutno zadat cíle jednotlivých výstupních parametrů. Bylo možné nastavit: minimalizovat, maximalizovat a nalézt specifikovanou hodnotu jednotlivých výstupních parametrů. V případě maximální efektivnosti křídla byly jako cíle zvoleny maximalizovat přítlak a minimalizovat odpor. Nejlepší kandidát vybrán, jako ten s nejlepším poměrem přítlaku k odporu. Pro zbylé dvě varianty byly cíle vždy nastaveny na zachování specifické hodnoty sekundární výstupní veličiny na hodnotu původního stavu. Druhým cílem bylo buď maximalizovat nebo minimalizovat primární výstupní veličinu. Nejlepší z navržených kandidátů byl vybrán tak, že nejprve byli vyřazeni jedinci, kteří nesplňovali požadovanou podmínku a poté seřazeni podle sledovaného faktoru. V případě redukce odporu byli vyřazeni ti, co nedosáhli hodnoty současného stavu přítlaku a následně seřazeni podle nejnižšího odporu a při maximalizaci přítlaku byli vyřazeni kandidáti s odporem větším než současné řešení a poté vybrán ten s maximálním přítlakem. V tabulkách 5.2 a 5.3 je možno nalézt nejlepší vhodné kandidáty a jejich porovnání se současným řešením. [40][41]

Tab. 5.2 – Hodnoty jednotlivých variant pro krajní polohu křídla

Typ	Přítlak[N]	Odpor [N]	Poměr [-]	Změna přítlaku [%]	Změna odporu [%]	Změna poměru [%]
<b>Původní stav</b>	450	23	19,56	-	-	-
<b>Maximální efektivita</b>	529	11,95	44,26	17,56	-48,04	126,26
<b>Minimalizace odporu</b>	458	8,82	51,94	1,78	-61,65	165,41
<b>Maximalizace přítlaku</b>	678	23,05	29,42	50,69	0,22	50,36

Tab. 5.3 – Hodnoty jednotlivých variant pro střední polohu křídla

Typ	Přítlak [N]	Odpor [N]	Poměr [-]	Změna přítlaku [%]	Změna odporu [%]	Změna poměru [%]
<b>Původní stav</b>	390,5	41,9	9,32	-	-	-
<b>Maximální efektivita</b>	402	18,67	21,53	2,95	-55,44	131,03
<b>Minimalizace odporu</b>	390,92	18,14	21,55	0,1	-56,7	131,23
<b>Maximalizace přítlaku</b>	472	41,85	11,3	21,06	-0,11	21,2

Hodnoty 5 nejlepších kandidátů a jejich konfigurací vstupních parametrů je možno nalézt v příloze P1. Tlaková a rychlostní pole v daných rovinách pro definované případy je možno nalézt v příloze P2.

Jednotlivé elementy křídel byly vytvořeny pomocí protáhnutí 3 profilů. Vždy tak, že se jeden profil nachází v rovině symetrie vozidla s parametry odpovídajícími konfiguraci pro střední polohu a zbylé dva profily se nacházejí ve vzdálenostech 400 mm a 445 mm od roviny symetrie vozidla. Oba s totožnými parametry pro polohu krajní. Díky tomu se zajistí vyrobitelnost a normálové dosednutí na bočnice. Výsledné tvary křídel je možno nalézt v příloze P3.

## ZÁVĚR

Citlivostní analýza byla vytvořena na základě plochy odezvy potvrzuje vlastnosti více-elementového křídla, kdy pro dosažení maximální přítláčné síly je nutné použít elementy s co největší délkou tětiny a úhlu náběhu. Zvyšování těchto parametrů zvýší jak přítlak, tak odpor je proto nutné dbát velký důraz na nalezení optimální konfigurace. K tomuto účelu byla využita cílem řízená optimalizace.

Optimalizace na základě plochy odezvy ve 2D prostoru ukázaly, že v porovnání se současným provedením je možné s použitím efektivnějších profilů, docílit výrazně lepších výsledků vlastností křídla. Tito navržené jedinci, ale nepředstavují globální optima, pouze byla nalezena oblast, ve které by se měly nacházet. Pro potřeby této bakalářské práce nebyla provedena optimalizace směřující k nalezení těchto optim, ale při vývoji nového monopostu budou tyto techniky použity. Je nutno brát v potaz, že hodnoty výsledných sil jsou brány pro křídla široká 1 m. Samotná kalibrace výpočetního modelu ukázala chybu přítláčné síly v porovnání s experimentem 10,5 %. Nelze očekávat totožné hodnoty výsledných sil při použití těchto křídel na profilu.

Je nutno si uvědomit, že simulace probíhaly za velmi zjednodušených podmínek a křídlo po celé délce není vystaveno totožným podmínkám. Je ovlivněno geometrií celého monopostu. I přes toto je možné očekávat výrazné zlepšení oproti současnému provedení. Varianta pro maximální efektivitu a minimalizaci odporu je pravděpodobně svými výslednými vlastnostmi blíže těm předpokládaným, z důvodu méně výrazného zaoblení jednotlivých elementů a díky tomu bližší podobnosti předpokladům 2D simulaci. Křídlo, navržené pro požadavek maximalizace přítláčné síly, je ovšem výrazně zakřiveno. Křídla obecně generují přítláčnou sílu na základě tlakového rozdílu na vrchní a spodní straně profilu a výsledná síla je kolmá na jeho povrch. Při výrazném zakřivení elementu síla nepůsobí ve vertikálním směru a dochází tak k zásadnímu poklesu generované síly. Tento problém lze v budoucnu vyřešit přidáním podmínky do případné opětovné optimalizace, kdy bude poloha náběžné hrany v jednotlivých řezech bude omezena maximálním rozdílem vstupních parametrů.

Pro potvrzení předpokládaných výsledků je však nutné provést 3D simulace celého monopostu. Tyto simulace jsou časově velice náročné, nebyly proto do této bakalářské práce zahrnuta, ale během léta budou provedeny. Z důvodů pandemické situace nebude žádná z navržených konfigurací použita na monopostu Dragon X. Poznatky získané z této práce poslouží k zjednodušení vývoje závodního vozidla v následující sezóně.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Formula Student Germany: International design competition* [online]. Langenhagen [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>
- [2] *Formule Student. TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/formula-student/>
- [3] *Disciplines. Formula Student Germany* [online]. [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>
- [4] *Photos Hockenheim: Panoramic Picture. In: Formula Student Germany: International design competition* [online]. ©2021 [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://media.formulastudent.de/2019/Hockenheim/Panoramic-Picture/i-hxz64pG>
- [5] *History of Formula SAE. Formula SAE* [online]. Warrendale, ©2020 [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [6] *Formula Student: History of Formula Student. Institution of Mechanical Engineers* [online]. London, ©2021 [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>
- [7] *O nás. TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/tu-brno-racing/>
- [8] *Formula Student Combustion – World Ranking List. FS-World* [online]. Německo: Formula Student Germany, 2021 [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.fs-world.org/C/>
- [9] *Dragon X a Dragon eD1. In: Soukromý disk týmu TU Brno racing: Fotoarchiv* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021 [cit. 2021-05-21].
- [10] *Rules & Important Documents. Formula Student Germany* [online]. [cit- 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [11] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. 4th ed. London: Butterworths, 1998. ISBN 07-680-0029-7.
- [12] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designig for speed*. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, [2006]. ISBN 9780837601427.
- [13] MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Somerset: Haynes Publishing, 2008. ISBN 1844252302
- [14] *The three different rear wings F1 teams are using for Baku's long straights. RaceFans: Independent motorsport coverage* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.racefans.net/2019/04/26/the-three-different-rear-wings-f1-teams-are-using-for-bakus-long-straights/>

- [15] Formula One Rear Wing Optimization [online]. , 21-22 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12270/PFC%20%20Formula%20One%20Rear%20Wing%20Optimization.pdf>
- [16] 2020 Italian GP: Ferrari first practice report: Charles P11, Sebastian P19. *ScuderiaFans* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://scuderiafans.com/2020-italian-gp-ferrari-first-practice-report-charles-p11-sebastian-p19/>
- [17] Aerodynamics of WRC cars sideways: endplates and vertical fins. *WRC Wings: Aerodynamics of WRC* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.wrcwings.tech/2018/08/08/aerodynamics-of-wrc-cars-sideways/>
- [18] ČECHOVIČ, Juraj. Aktivní aerodynamické prvky Formule Student. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121471>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 51s. Vedoucí práce Michal Janoušek.
- [19] F0711-14(2019). *Rennteam Stuttgart* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.rennteam-stuttgart.de/f0711-14/>
- [20] TU Wien Racing. *Instagram* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/p/B2te8SAIRF2/>
- [21] TU BRNO RACING. *Dragon 4 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2014.
- [22] Garáž: Dragon 4. *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon4/>
- [23] TU BRNO RACING. *Dragon 5 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2015.
- [24] TU BRNO RACING. *Dragon 6 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2016.
- [25] JÁNOŠÍK, T. Aerodynamický návrh nové generace přitlačných křídel formule SAE. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Robert Popela, Ph.D.
- [26] HAVRAN, Edmund. Návrh konstrukce elementů předního křídla Formule Student. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121507>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 60 s. Vedoucí práce Robert Popela.
- [27] Garáž: Dragon 7. *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon7/>
- [28] TU BRNO RACING. *Dragon 8 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2018.

- [29] TU BRNO RACING. *Dragon 9 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2019.
- [30] Garáž: Dragon 9. *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon-9/>
- [31] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [32] Willem Toet explains...CFD PostProcessing: Part 2. *Race Tech: Motorsport Engineering* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.racetechnmag.com/2019/02/willem-toet-explains-cfd-post-processing-part-2/>
- [33] SELIG, Michael S., James J. GUGLIELMO, Andy P. BROEREN a Philippe GIGUERE. *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. Virginia Beach, Virginia: SoarTech Publications, 1995. ISBN 0-9646747-1-8
- [34] SCHLICHTING, Hermann a Klaus GERSTEN. *Boundary-Layer Theory*. 9th ed. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-52919-5. ISBN 9783662529171
- [35] ANSYS, INC. 2021. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA.
- [36] ANSYS, INC. 2021. *ANSYS Fluent User's Guide*. Canonsburg, PA.
- [37] MASÁROVÁ, Mária. *Genetické algoritmy*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. František V. Zbořil, CSc.
- [38] MAYERS, Raymond H., Douglas C. MONTGOMERY a Christine M. ANDERSON-COOK. *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 4. vydání. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2016. ISBN 9781118916018.
- [39] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. 9. vydání. Arizona State University: John Wiley, 2017. ISBN 9781119113478.
- [40] ANSYS, INC. 2021. *ANSYS DesignXplorer User's Guide*. Canonsburg, PA.
- [41] ANSYS, INC. 2021. *ANSYS DesignXplorer Optimization Tutorials*. Canonsburg, PA.
- [42] Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832005002012>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$C_L$	[-]	Koeficient vztlaku
$C_D$	[-]	Koeficient odporu
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudění
$d$	[m]	Charakteristický rozměr
$\mu$	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Dynamická viskozita
$K_I$	[-]	Tunelová korekční konstanta
$M_v$	[m <sup>3</sup> ]	objem modelu profilu
$A_{ts}$	[m <sup>2</sup> ]	obsah testované ploch
$c$	[m]	délka tětiny profilu
$h_{ts}$	[m]	výška testovacího prostoru
$\varepsilon_{sb}$	[-]	Tělesová blokace
$\varepsilon_{wb}$	[-]	Úplavová blokace
$C_{lu}$	[-]	Koeficient přitlaku před korekcí
$C_{du}$	[-]	Koeficient odporu před korekcí
$\sigma$	[-]	Tunelový korekční parametr
$C_{SEP}$	[-]	Separační koeficient modelu k- $\omega$ GEKO

FS	Formule student
SAE	Society of Automotive Engineers
F1	Formule 1
LMP	Le Mans Prototype car
CoP	Střed aerodynamických sil
S1223	Selig S1223
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer Aided Design
SST	Shear-Stress Transport
GEKO	Generalized k-omega
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
NLPQL	Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian
MISQP	Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming



## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 – Velikosti elementů v daných oblastech .....	31
Tab. 4.2 – Parametry zjemnění na hranách .....	31
Tab. 4.3 – Nastavení prismatických vrstev .....	31
Tab. 4.4 – Nastavení modelu a fyzikálních vlastností řešiče .....	33
Tab. 4.5 – Okrajové podmínky výpočtu .....	33
Tab. 5.1 – Rozsahy jednotlivých parametrů .....	39
Tab. 5.2 – Hodnoty jednotlivých variant pro krajní polohu křídla .....	43
Tab. 5.3 – Hodnoty jednotlivých variant pro střední polohu křídla .....	43

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 – Závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu .....	26
Graf 3.2 – Závislost koeficientu odporu na úhlu náběhu .....	26
Graf 3.3 – Polára profilu .....	27
Graf 3.4 – Závislost relativní odchylky $C_L$ na počtu elementů .....	28
Graf 3.5 – Závislost relativní odchylky $C_D$ na počtu elementů .....	28
Graf 3.6 – Závislost času generace výpočetní sítě .....	28
Graf 5.1 – Citlivostní analýza přítlaku .....	40
Graf 5.2 – Citlivostní analýza odporu .....	41

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Fotografie týmů po závodě Formula Student Germany [4] .....	12
Obr. 1.2 – Monoposty Dragon X a Dragon e1[9].....	13
Obr. 1.3 – Grafické znázornění omezení aerodynamických prvků [10] .....	14
Obr. 2.1 – Porovnání konfigurací zadních křídel na monopostu F1[16] .....	16
Obr. 2.2 – Ukázka zadního křídla rallye vozu [17] .....	17
Obr. 2.3 – Monopost týmu Rennteam [19].....	18
Obr. 2.4 – Monopost týmu TU Wien [20] .....	18
Obr. 2.5 – Monopost Dragon 4 [22] .....	19
Obr. 2.6 – Monopost Dragon 7 [27] .....	19
Obr. 2.7 – Monopost Dragon 9 [30] .....	20
Obr. 2.8 – Zobrazení vířivosti proudění okolo monopostu Dragon X .....	21
Obr. 3.1 – Ukázkový příklad výsledků CFD simulací [32].....	22
Obr. 3.2 – Detail profilu Selig S1223 .....	23
Obr. 3.3 – Geometrie kalibrace výpočetního modelu.....	25
Obr. 3.4 – Výsledná výpočetní síť .....	29
Obr. 3.5 – Rychlostní pole virtuálního tunelu .....	29
Obr. 4.1 – Geometrie krajní oblasti .....	30
Obr. 4.2 – Geometrie středové části .....	30
Obr. 4.3 – Výpočetní síť krajní oblasti .....	32
Obr. 4.4 – Výpočetní síť středové oblasti.....	32
Obr. 5.1 – Diagram optimalizačního procesu.....	34
Obr. 5.2 – Zobrazení rovin, ve kterých bude probíhat proces optimalizace.....	37
Obr. 5.3 – Schematické znázornění parametrů.....	38
Obr. 5.4 – Rozměrová obálka dovolená pravidly .....	38

## SEZNAM PŘÍLOH

P1	Tabulky parametrů 5 nejvhodnějších jedinců .....	53
P1.1	Jedinci s maximální efektivitou – střed.....	53
P1.2	Jedinci s minimalizací odporu – střed.....	54
P1.3	Jedinci s maximalizací přtlaku – střed .....	55
P1.4	Jedinci s maximální efektivitou – kraj .....	56
P1.5	Jedinci s minimalizací odporu – kraj .....	57
P1.6	Jedinci s maximalizací přtlaku – kraj.....	58
P2	Rychlostní a tlakové pole vítězných jedinců.....	59
P2.1	Pole pro maximální efektivitu – střed .....	59
P2.2	Pole pro minimalizaci odporu – střed .....	60
P2.3	Pole pro maximalizaci přtlaku – střed .....	61
P2.4	Pole pro maximální efektivitu – kraj.....	62
P2.5	Pole pro minimalizaci odporu – kraj.....	63
P2.6	Pole pro maximalizaci přtlaku – kraj .....	64
P3	Tvar výsledného křídla .....	65
P3.1	Křídlo s maximální efektivitou .....	65
P3.2	Křídlo s minimální odporem .....	66
P3.3	křídlo s maximálním přtlakem .....	67

## PŘÍLOHY

### P1 TABULKY PARAMETRŮ 5 NEJVHODNĚJŠÍCH JEDINCŮ

#### P1.1 JEDINCI S MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITOU – STŘED

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,33	0,34	0,33	0,31	0,32
AoA_RW1 [°]	1,74	1,89	1,74	-0,84	1,41
Scale_RW2 [-]	0,14	0,15	0,14	0,16	0,16
AoA_RW2 [°]	27,96	28,56	27,84	30,31	29,01
X_RW2 [mm]	44,97	53,96	44,47	47,48	43,76
Y_RW3 [mm]	38,92	51,66	42,35	52,6	60,8
Scale_RW3 [-]	0,2	0,18	0,2	0,19	0,17
AoA_RW3 [°]	19,61	21,2	19,58	21,12	19,96
X_RW3 [mm]	47,94	39,8	47,64	40,5	44,74
Y_RW3 [mm]	62,84	59,05	62,6	52,64	47,05
LIFT [N]	402,17	402,02	407,56	407,73	403,46
DRAG [N]	18,67	19,59	19,89	19,92	19,92

## P1.2 JEDINCI S MINIMALIZACÍ ODPORU – STŘED

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,34	0,35	0,35	0,33	0,34
AoA_RW1 [°]	-0,92	-1,37	-0,9	-2,2	-1,66
Scale_RW2 [-]	0,15	0,13	0,15	0,15	0,16
AoA_RW2 [°]	28,64	29	28,03	27,58	27,31
X_RW2 [mm]	41,24	43,3	46,27	40,01	44,94
Y_RW3 [mm]	45,83	53,37	58,36	51,31	49,28
Scale_RW3 [-]	0,16	0,19	0,15	0,16	0,15
AoA_RW3 [°]	18,86	14,59	20,99	23,06	14,6
X_RW3 [mm]	42,31	42,22	33,87	32,05	33,87
Y_RW3 [mm]	53,31	56,53	48,71	55,54	46,59
LIFT [N]	390,92	393,14	391,72	390,47	388,41
DRAG [N]	18,14	19,39	19,72	19,84	20,18

**P1.3 JEDINCI S MAXIMALIZACÍ PŘÍTLAKU – STŘED**

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,37	0,34	0,38	0,34	0,38
AoA_RW1 [°]	-1,98	-1,97	-2,5	-1,97	-2,54
Scale_RW2 [-]	0,17	0,19	0,17	0,19	0,17
AoA_RW2 [°]	30,22	30,09	30,41	29,6	29,34
X_RW2 [mm]	35,41	32,02	38,58	27,4	30,82
Y_RW3 [mm]	35,8	35,61	33,86	35,61	32,29
Scale_RW3 [-]	0,18	0,17	0,16	0,17	0,17
AoA_RW3 [°]	22,58	24,51	24,14	24,37	23,27
X_RW3 [mm]	52,81	49,09	48,52	49,09	48,63
Y_RW3 [mm]	38,17	38,48	32,85	41,29	48,98
LIFT [N]	472,73	470,57	470,53	467,54	466,39
DRAG [N]	41,85	40,74	41,02	40,67	41,46

#### P1.4 JEDINCI S MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITOU – KRAJ

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,48	0,47	0,48	0,5	0,5
AoA_RW1 [°]	0,11	-0,21	-1,08	-2,83	-0,15
Scale_RW2 [-]	0,28	0,29	0,27	0,27	0,3
AoA_RW2 [°]	25,96	25,14	22,2	22,15	25,78
X_RW2 [mm]	38,29	20,13	42,48	3,57	42,85
Y_RW3 [mm]	66,81	82,74	84,58	54,39	89,18
Scale_RW3 [-]	0,17	0,17	0,19	0,16	0,18
AoA_RW3 [°]	15,18	24,98	25,32	18,51	23,31
X_RW3 [mm]	26,87	34,93	37,65	19,55	27,92
Y_RW3 [mm]	60,38	55,68	56,99	61,62	53,15
LIFT [N]	529,14	556,33	555,85	529,83	576,57
DRAG [N]	11,95	13,28	13,52	12,89	14,06



**P1.5 JEDINCI S MINIMALIZACÍ ODPORU – KRAJ**

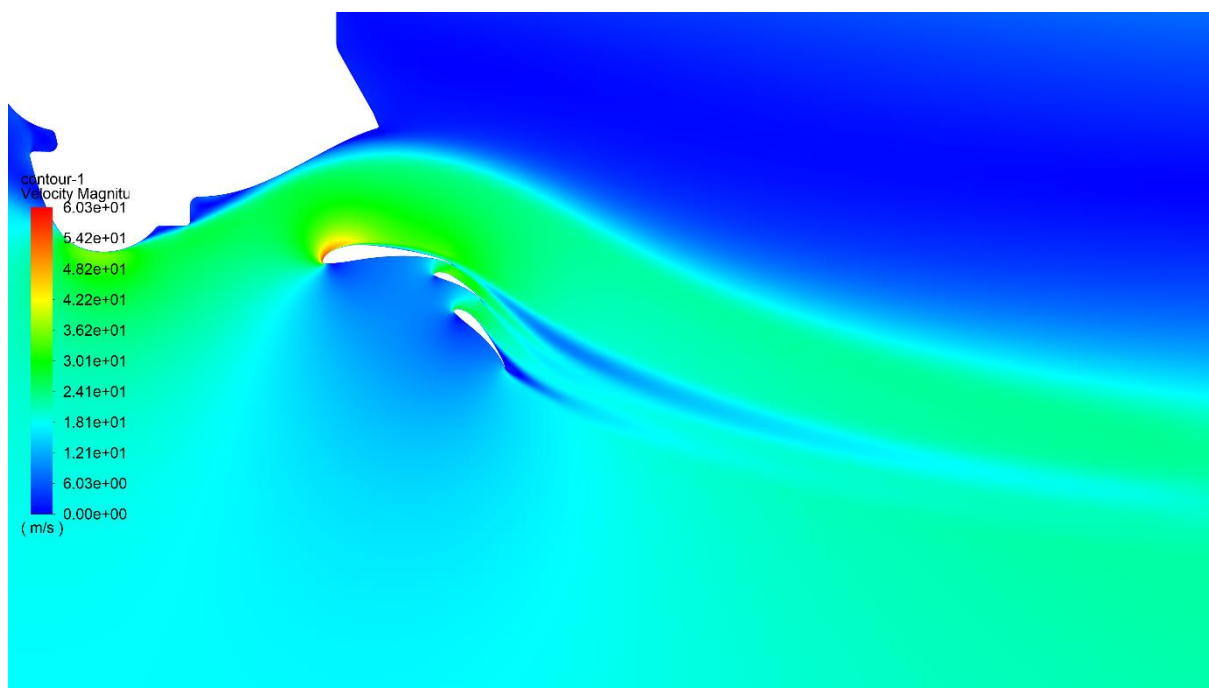
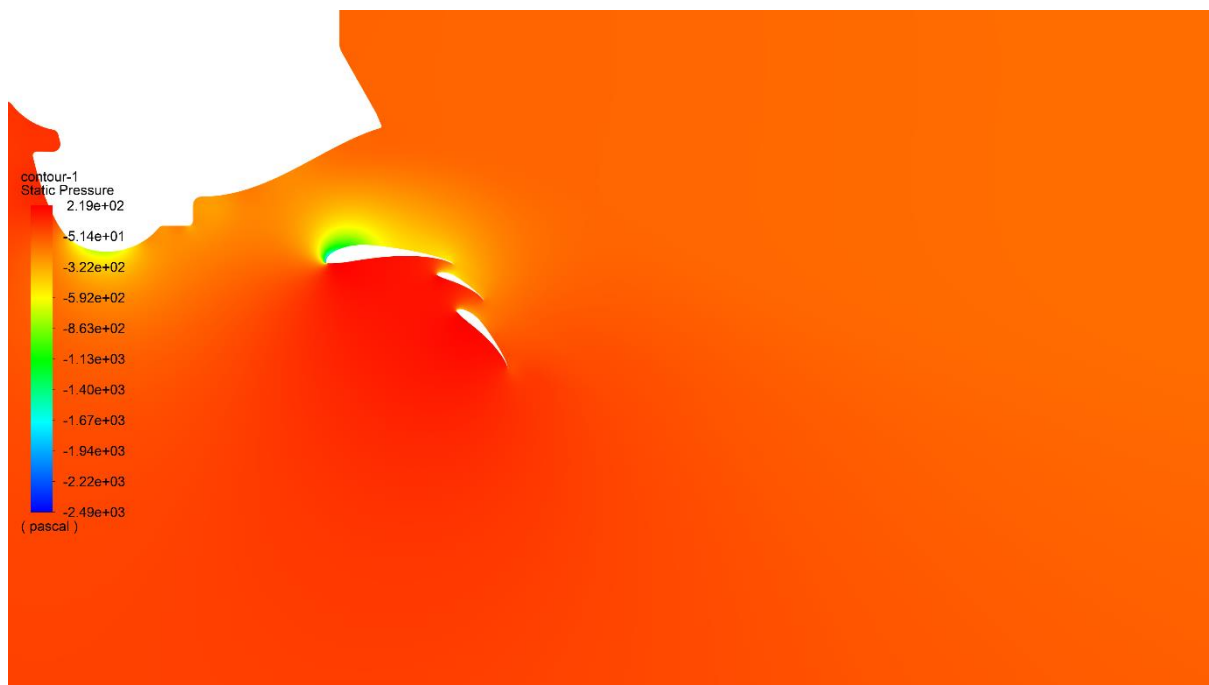
Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,45	0,47	0,45	0,46	0,46
AoA_RW1 [°]	2,53	1,61	2,82	-2,09	-1,69
Scale_RW2 [-]	0,22	0,29	0,28	0,16	0,27
AoA_RW2 [°]	23,51	25,91	21,89	21,19	22,52
X_RW2 [mm]	42,68	56,24	44,06	43,21	32,83
Y_RW3 [mm]	63,79	82,47	54,65	80,32	85,67
Scale_RW3 [-]	0,16	0,16	0,2	0,16	0,1
AoA_RW3 [°]	22,88	6,99	14,84	17,69	24,84
X_RW3 [mm]	41,67	52,72	56,95	9,54	54,6
Y_RW3 [mm]	34,04	62,29	40,99	25,22	30,68
LIFT [N]	458,1	454,77	455,07	450,68	451,57
DRAG [N]	8,82	8,86	8,99	9,18	9,25

### P1.6 JEDINCI S MAXIMALIZACÍ PŘÍTLAKU – KRAJ

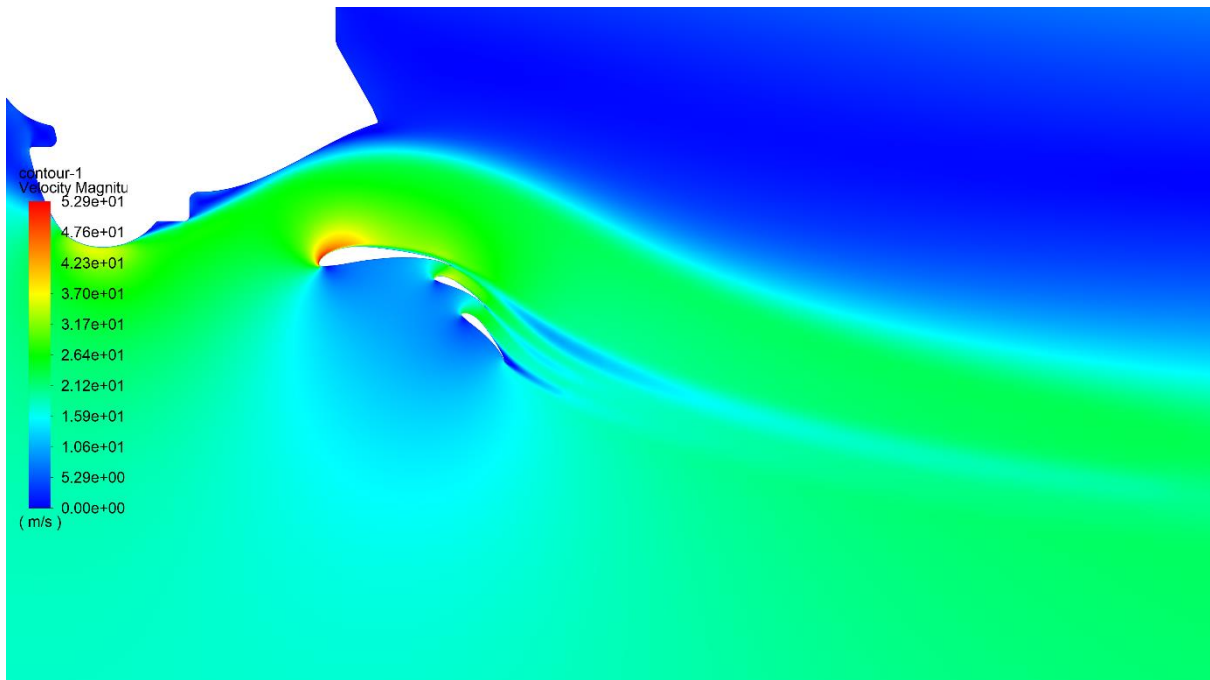
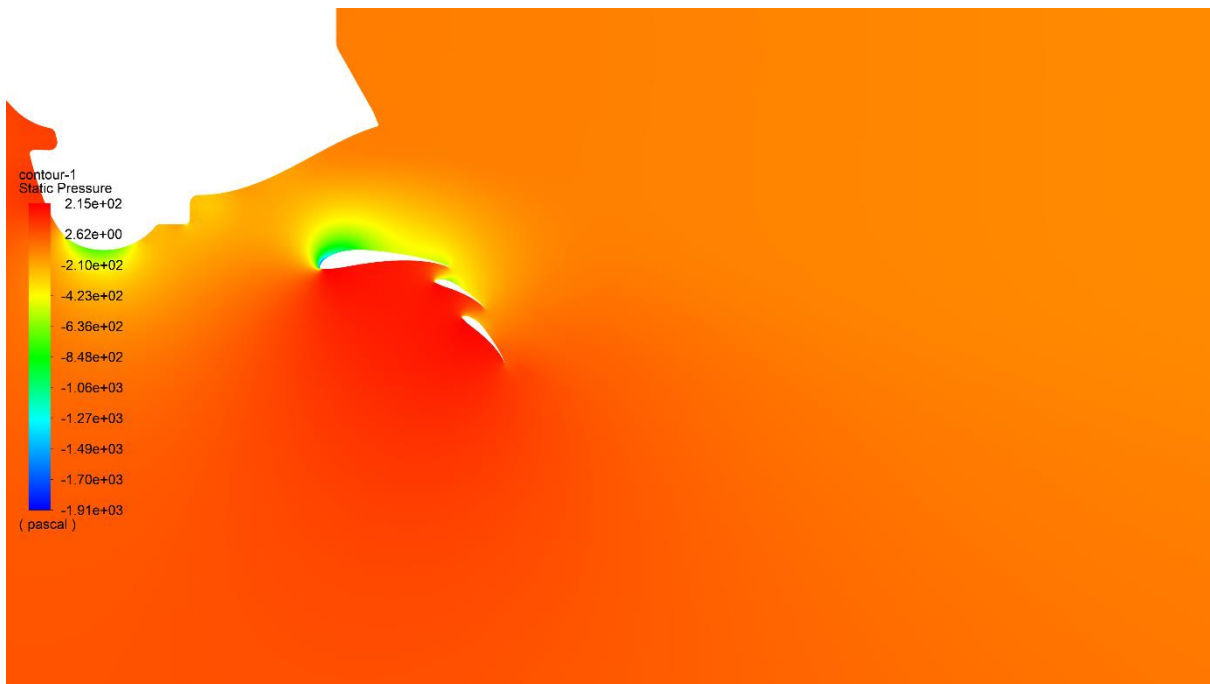
Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Scale_RW1 [-]	0,46	0,44	0,43	0,47	0,45
AoA_RW1 [°]	-2,35	-3,95	-2,04	-2,9	-2,4
Scale_RW2 [-]	0,29	0,29	0,3	0,28	0,29
AoA_RW2 [°]	29,38	28,73	29,07	34,18	29,84
X_RW2 [mm]	38,61	15,35	22,62	29,67	28,58
Y_RW3 [mm]	76,47	73,66	65,96	64,36	73,12
Scale_RW3 [-]	0,2	0,19	0,2	0,18	0,19
AoA_RW3 [°]	35,74	33,05	32,59	20,04	28,68
X_RW3 [mm]	36,78	32,43	30,58	47,07	23,23
Y_RW3 [mm]	34,97	42,02	43,12	51,12	32,52
LIFT [N]	678,1	666,8	662,73	656,15	652,24
DRAG [N]	23,05	22,87	21,98	22,12	21,83

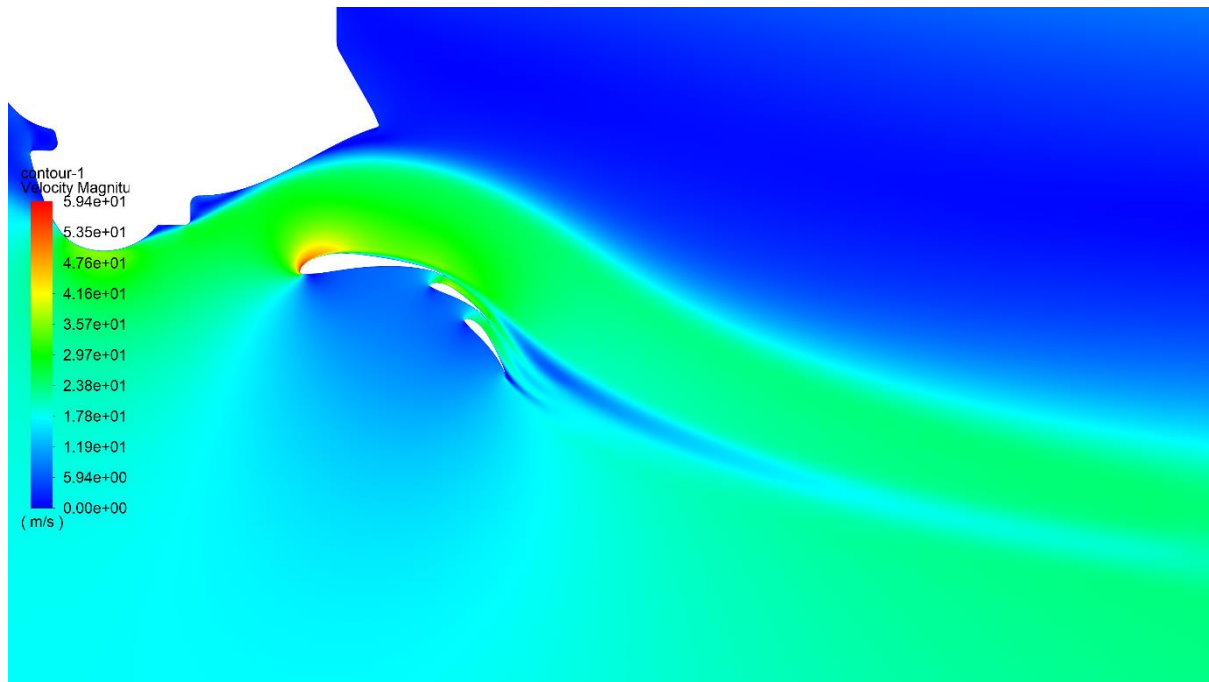
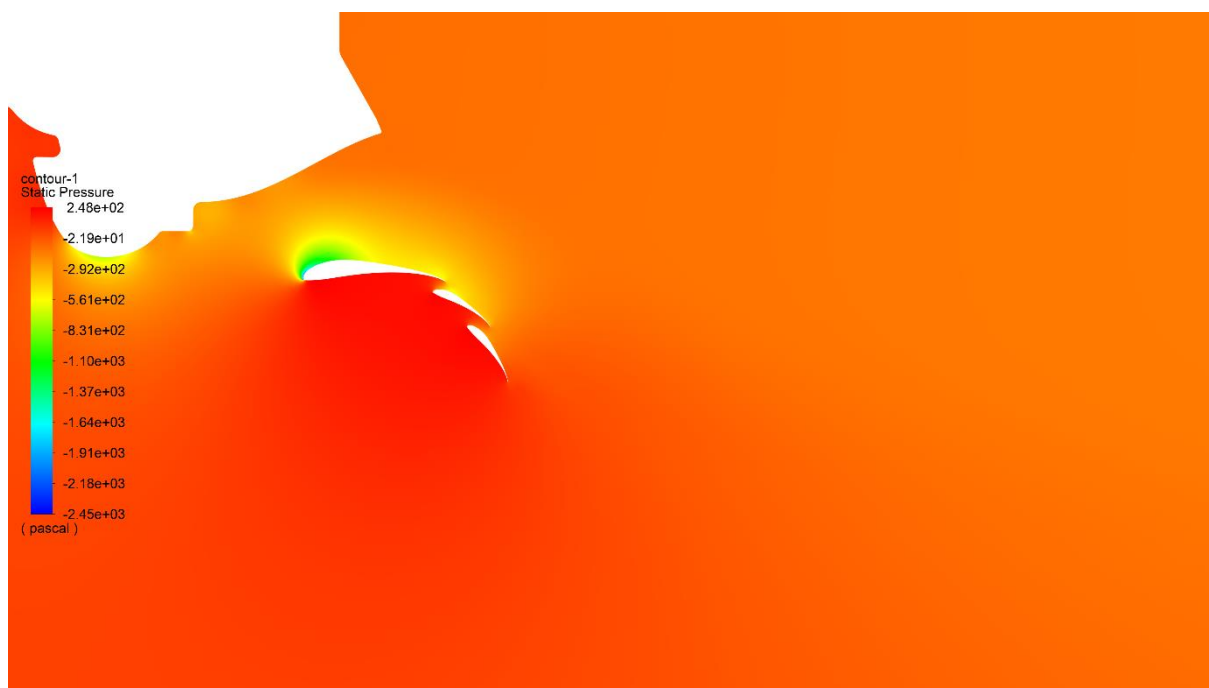
## P2 RYCHLOSTNÍ A TLAKOVÉ POLE VÍTĚZNÝCH JEDINCŮ

### P2.1 POLE PRO MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITU – STŘED

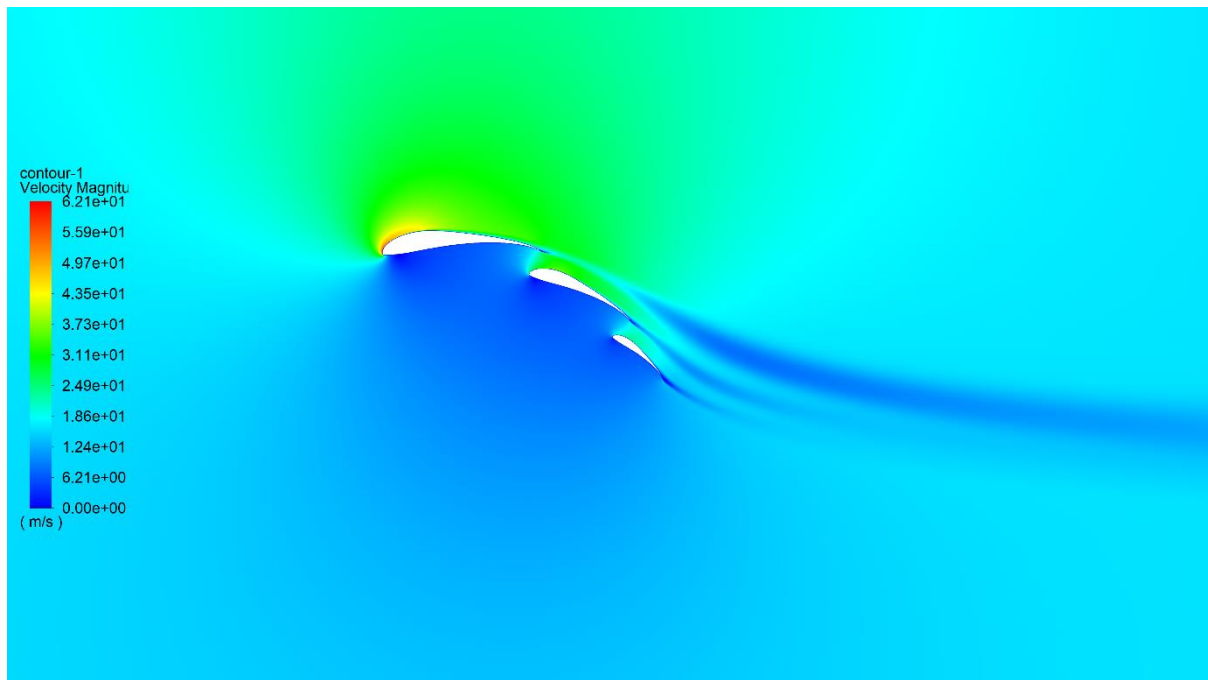
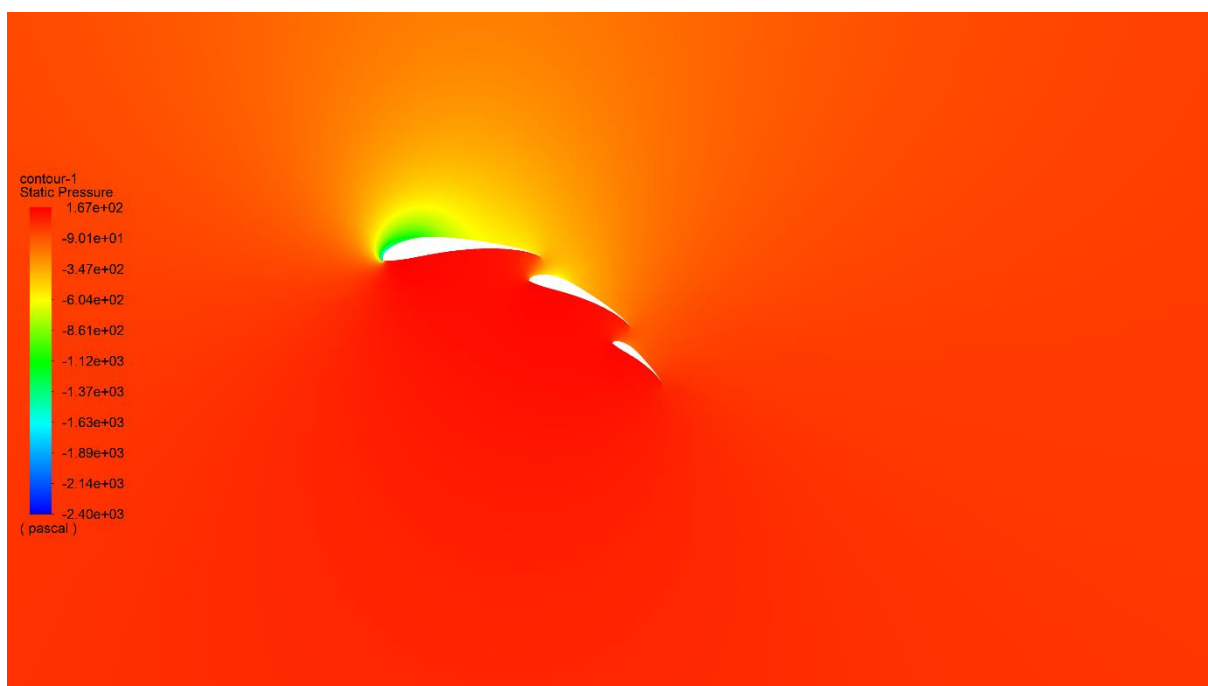


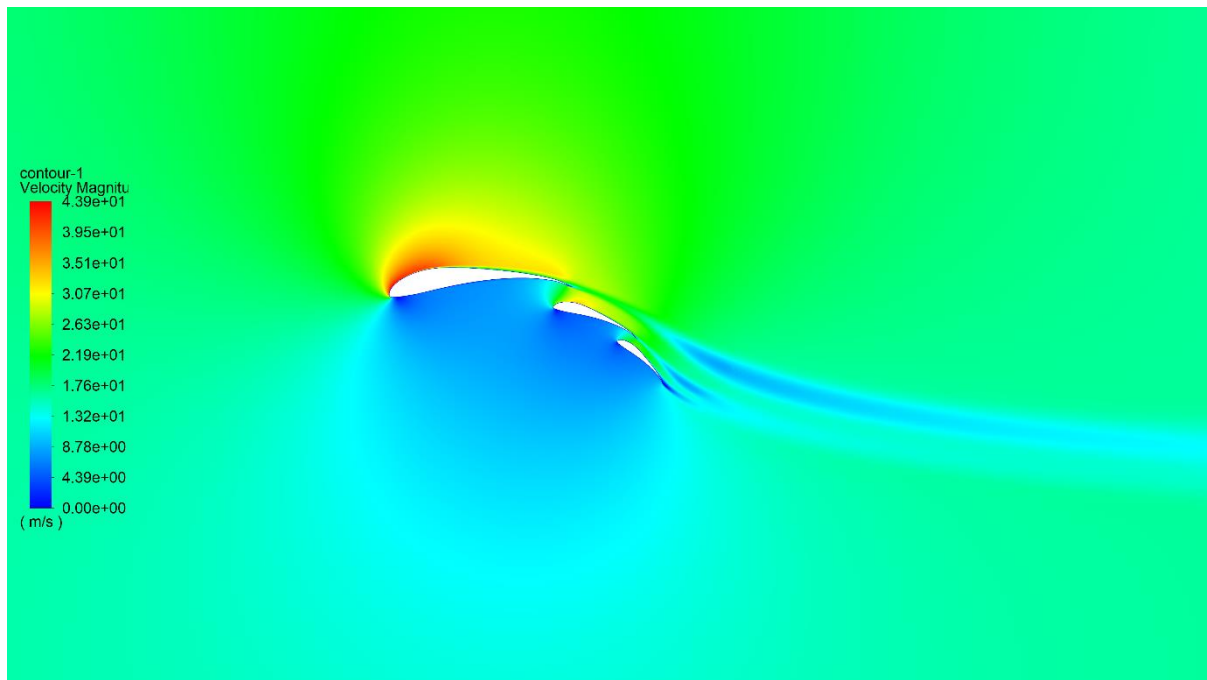
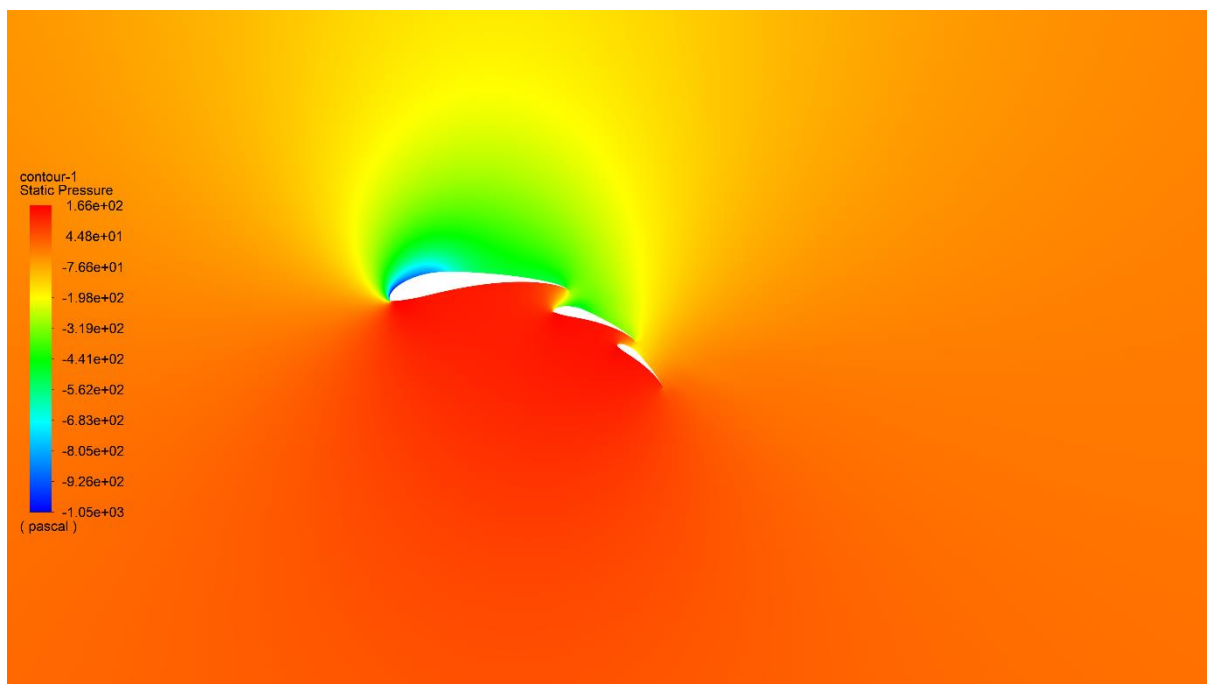
## P2.2 POLE PRO MINIMALIZACI ODPORU – STŘED



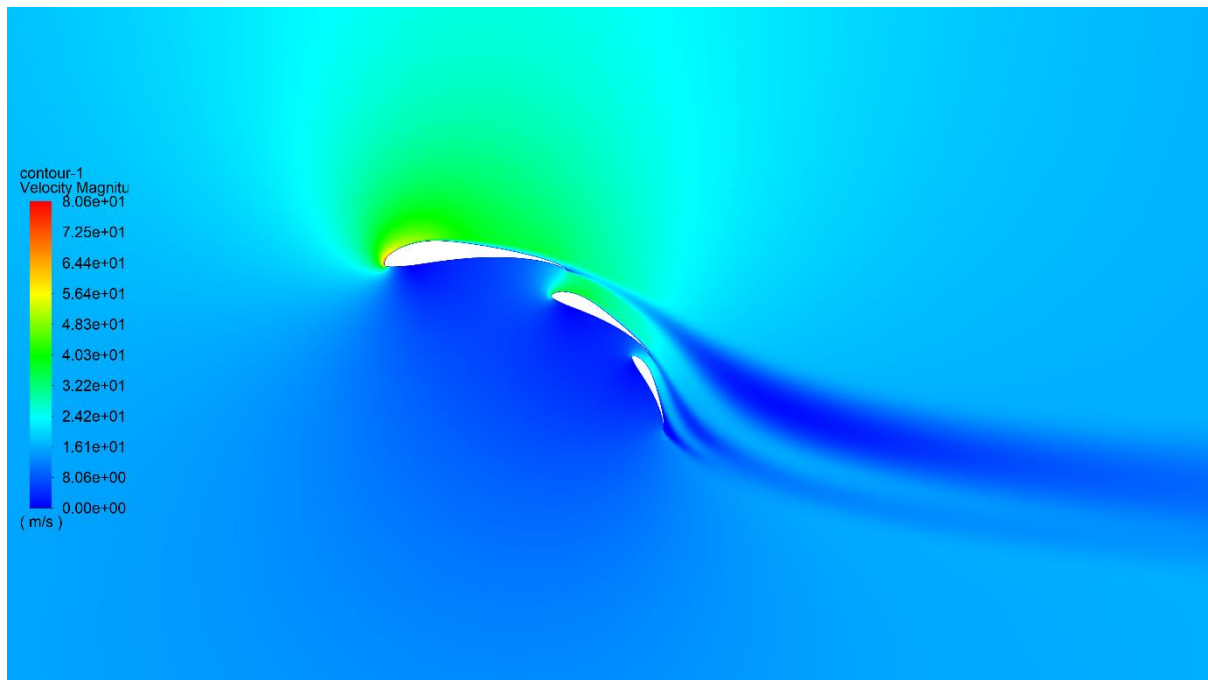
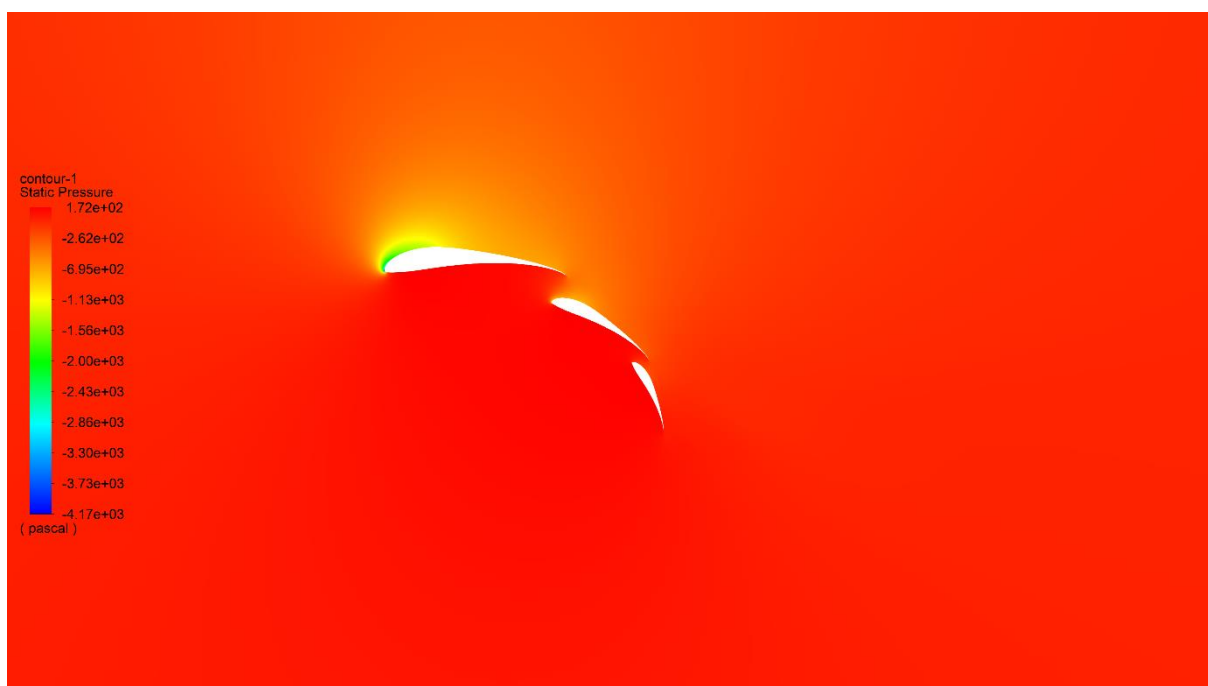
**P2.3 POLE PRO MAXIMALIZACI PŘÍTLAKU – STŘED**

## P2.4 POLE PRO MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITU – KRAJ

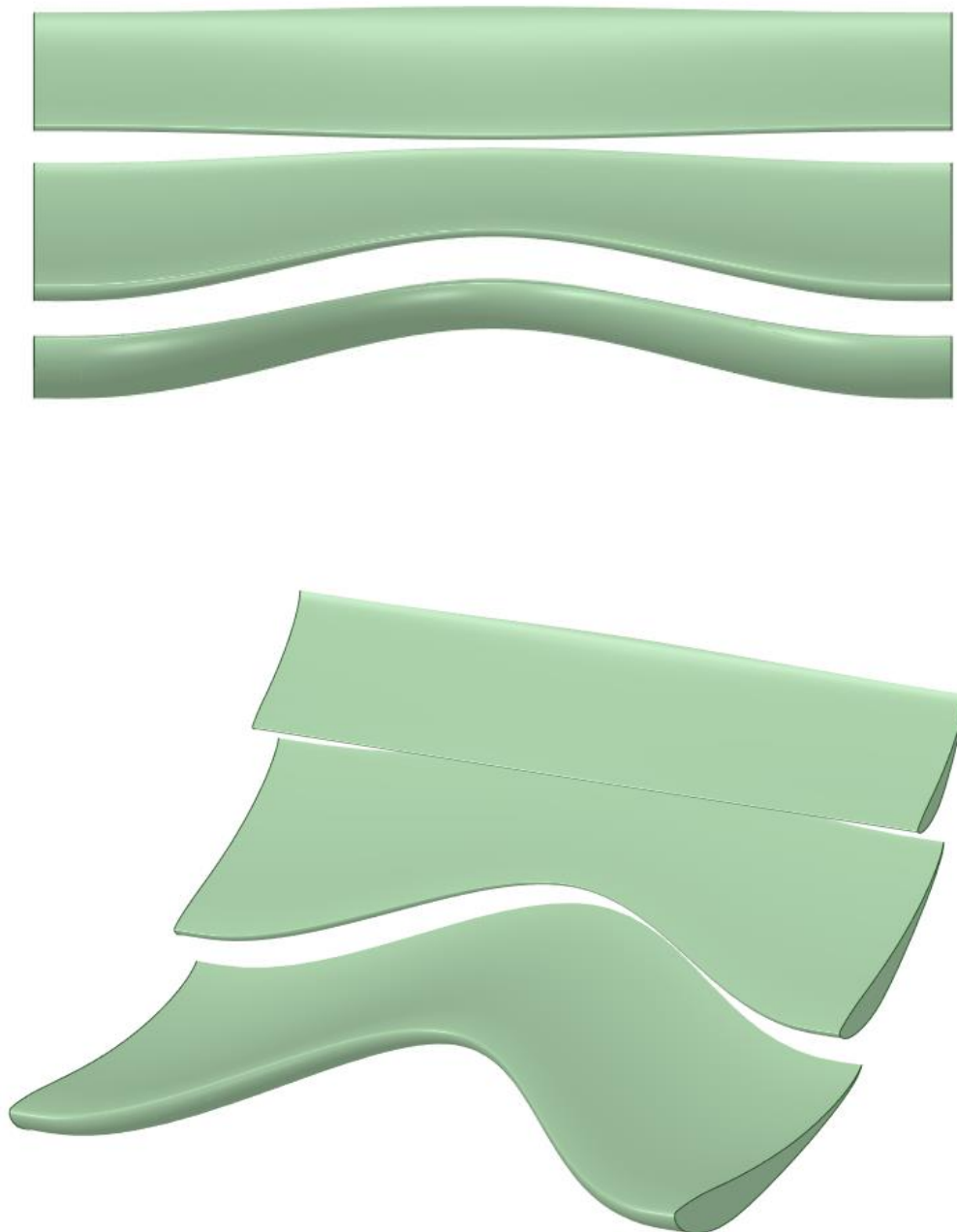


**P2.5 POLE PRO MINIMALIZACI ODPORU – KRAJ**

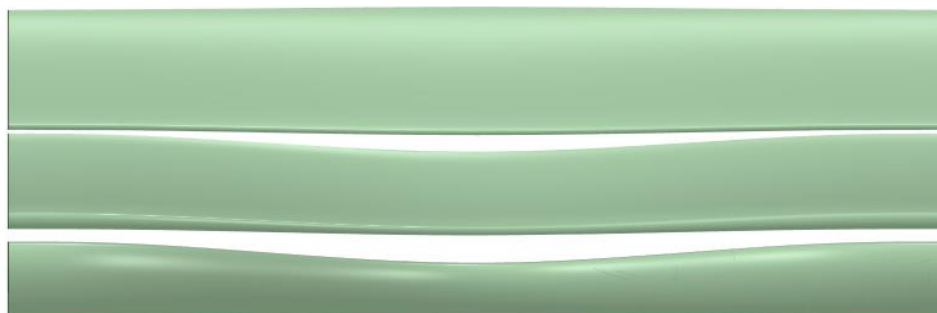
## P2.6 POLE PRO MAXIMALIZACI PŘÍTLAKU – KRAJ





**P3 TVAR VÝSLEDNÉHO KŘÍDLA****P3.1 KŘÍDLO S MAXIMÁLNÍ EFEKTIVITOU**

### P3.2 KŘÍDLO S MINIMÁLNÍ ODPOREM



**P3.3 KŘÍDLO S MAXIMÁLNÍM PŘÍTLAKEM**